الفصل الأول

نبذة عن الذرة والنواة
The atom and the nucleus

– مقدمة – الذرة – العدد الكتلي – العدد الذري – النظائر – حجم وكتلة النواة – الوحدة الذرية للطاقة – طاقة الترابط للنواة – أسئلة ومسائل

1–1 مقدمة

خلق الله الكون، الذي نسكن جزءاً منه، من مجموعة مواد كالماء والهواء والرمل والحديد والخشب. وتوجد المادة في هذا الكون على شكل عناصر منفصلة أو مركبات لهذه العناصر أو في شكل مخاليط من عدة مواد . أما العنصر (element) فهو الصورة الأولية للمادة ولا يمكن تحويله إلى صورة أبسط بالطرق الكيميائية. وتتألف كل المواد الموجودة في هذا الكون من اثنين وتسعين عنصراً طبيعياً مثل الهيدروجين والأكسجين والحديد والذهب وغيرها. كما يمكن إنتاج عدة عشرات من العناصر الأخرى بطرق صناعية مثل عنصر البلوتونيوم ذي الأهمية البالغة في الأسلحة النووية وبعض المفاعلات .

وعند اتحاد عنصرين أو اكثر اتحاداً كيميائيا يتكون ما يسمى بالمركب (compound). فعلى سبيل المثال يتكون الماء (H_2O) من عنصري الهيدروجين والأكسجين في حين يتكون السكر من عناصر الكربون والأكسجين والهيدروجين. كذلك، يمكن أن يتحلل المركب إلى عناصره الأولية باستخدام الطرق الكيميائية.

2–1 الذرة The atom

يتكون العنصر من وحدات متشابهة متناهية في الصغر يطلق عليها اسم ذرات. وتختلف العناصر باختلاف ذراتها. وتتكون ذرة أي

عنصر من جسم مركزي حجمه صغير جداً يعرف بالنواة (nucleus) ويبلغ نصف قطرها حوالي 10^{-13} سم . ويدور حولها عدد من الإلكترونات في مدارات يبلغ نصف قطرها 10^{-8} سم . وتتكون النواة بدورها من جسيمات تعرف بالبروتونات (protons) والنيوترونات (neutrons).

البروتون The proton

جسيم نووي يحمل شحنة كهربية مساوية تماماً لشحنة الإلكترون ولكنها موجبة. وتبلغ كتلة السكون للبروتون 1.6726×10^{-27} كجم . وعند استخدام وحدات الكتلة الذرية (atomic mass units amu) تساوي كتلة البروتون 1.007276 وحدة كتلة ذرية (و.ك.ذ).

الإلكترون The electron

جسيم يدور في قشرات خارجية للنواة ويحمل شحنة كهربية سالبة قيمتها المطلقة مساوية تماماً لشحنة البروتون (أي أنها تساوي 1.6×10^{-19} كولوم. وكتلة الإلكترون أصغر من كتلة البروتون بحوالي 1840 مرة حيث تبلغ 9.11×10^{-31} كجم (أي 0.0005486 وحدة كتلة ذرية)

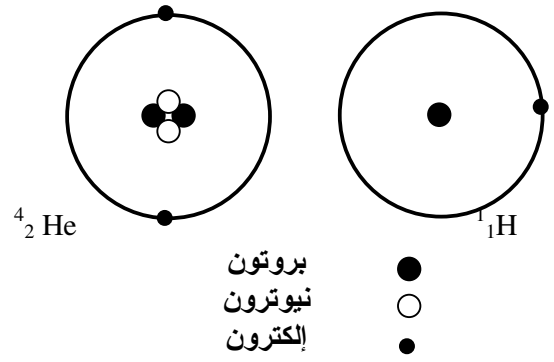
النيوترون The neutron

هو جسيم نووي متعادل الشحنة (أي لا يحمل شحنة كهربية)، وكتلته مساوية تقريباً لكتلة البروتون، حيث تبلغ 1.6749×10^{-27} كجم (أي 1.0086649 و.ك.ذ). وغالباً ما يتكون النيوترون نتيجة لاتحاد بروتون وإلكترون حيث إن النيوترون الحر (أي خارج النواة) يعيش في المتوسط لمدة 15 دقيقة ثم يتفكك تلقائيا إلى بروتون وإلكترون.

وهكذا، تشكل كل من البروتونات والنيوترونات الجسم المركزي للذرة والمعروف بالنواة وتدور حولها الإلكترونات في مدارات

أو قشرات (orbits or shells) مختلفة. ويتسع أقـــرب مـــدار للنـــواة لإلكترونين فقط ويعـــرف باسم المدار أو القشـــرة k (k-shell)، فـــي حين يتسع المدار الثاني والمعروف باسم المدار L لثمانية إلكترونـــات، ويتسع المدار الثالث والمعروف باسم المدار M لثمانية عشر إلكترونـــاً، والرابع وهو المدار N لثنين وثلاثين إلكتروناً .

والذرة متعادلة كهربياً حيث أن عدد البروتونات الموجبة فـــي النواة يتساوى دائماً مع عدد الإلكترونات السالبة في المـــدارات. ويبـــين شكل (1−1) رسماً تخطيطاً لذرتي الهيدروجين والهليوم. وتعتبـــر ذرة الهيدروجين أبسط الذرات على الإطلاق، وهي الذرة الوحيـــدة التـــي لا تحتوي على نيوترونات في نواتها حيث تتكون نواتها من بروتون واحد يدور حوله إلكترون واحد في المدار K عندما تكون الذرة غير مثارة .



شكل (1−1)
شكل تخطيطي لذرتي الهيدروجين والهليوم

1−3 العدد الكتلي والعدد الذري Mass and atomic numbers

العدد الكتلي للذرة هو مجموع عددي البروتونات والنيترونات في نواتها. ويوضح هذا العدد كتلة الذرة التقريبية بوحدات الكتلـــة الذريـــة حيث أن العدد الكتلي يكون دائما عددا صحيحا، أما الكتلة بوحدات الكتلة الذرية فتكون كسرا يقل قليلا عن العدد الصحيح. ولا يدخل في هذا العدد كتلة الإلكترونات نظراً لصغرها. ويرمز للعدد الكتلي بـــالرمز A. أمـــا

العدد الذري فهو عبارة عن عدد البروتونات في النواة، ويرمز له بالرمز Z. وعلى ذلك تتميز ذرة الهيدروجين $_1^1H$ بعدد ذري $Z = 1$ ، وعدد كتلي $A = 1$. وأما ذرة الهليوم $_2^4He$ فيميزها عدد ذري $Z = 2$ وعدد كتلي $A = 4$. وتتميز ذرة الكربون $_6^{12}C$ بعدد ذري $Z = 6$ وعدد كتلي $A = 12$ ، حيث تحتوي نواتها على ستة بروتونات وستة نيوترونات. أما ذرة اليورانيوم $_{92}^{238}U$ فعددها الذري $Z = 92$ في حين أن عددها الكتلي $A = 238$ ، حيث تحتوي نواة اليورانيوم على 92 بروتونا، 146 نيوترونا. ويعتبر اليورانيوم آخر وأثقل العناصر الموجودة في الطبيعة، ولكنه يمكن إنتاج عناصر ذات عدد ذري أو كتلي أعلى وذلك بطرق صناعية مثل البلوتونيوم $_{94}Pu$ وغيرها. ومن المتفق عليه أن يرمز للعنصر بأحرفه اللاتينية الأولى، ويكتب عدده الذري في الركن السفلي الأيسر وعدده الكتلي في الركن العلوي الأيسر .

1−4 النظائر The isotopes

تحتوي ذرات العنصر الواحد على العدد نفسه من البروتونات، إلا أنها قد تحتوي على أعداد مختلفة من النيترونات. ويعني هذا أن العدد الذري للعنصر الواحد لا يتغير، في حين يتغير عدده الكتلي تبعاً لعدد النيترونات. ويقال في هذه الحالة إن العنصر الواحد له عدة نظائر . فمثلاً نجد أن للهيدروجين ثلاثة نظائر هي:

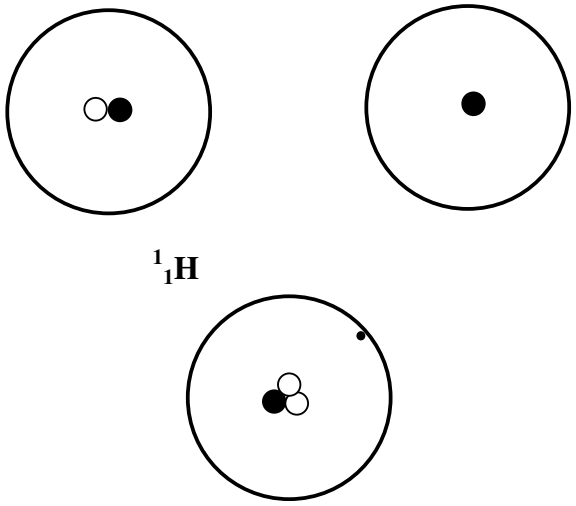
الهيدروجين−1 $_1^1H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ولا تحتوي على نيوترونات ($A = 1، Z = 1$)

الهيدروجين−2 $_1^2H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ونيوترون واحد ($A = 2، Z = 1$) ويعرف باسم الديتيريوم.

الهيدروجين−3 $_1^3H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ونيوترونين، أي أن ($A = 3 ، Z = 1$) ويعرف باسم التريتيوم.

ويبين شكل (1−2) النظائر المختلفة لعنصر الهيدروجين.

ويوجد لكل عنصر عدد من النظائر تصل أحياناً إلى أكثر من خمسين نظيراً للعنصر الواحد. وتكون بعض النظائر مستقرة في حين يكون بعضها الآخر نشطاً (radioactive) فيصدر إشعاعات نووية. وعموما، يوجد العنصر في الطبيعة في شكل خليط من بعض نظائره، وأما بعضها الآخر فلا يوجد عادة في الطبيعة وإنما يمكن إنتاجه صناعياً باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية.



$^{2}_{1}H$ $^{1}_{1}H$

$^{3}_{1}H$

شكل (1-2)

النظائر المختللفة لعنصر الهيدروجين

وتجدر الإشارة إلى أن نظائر العنصر الواحد تتحد في جميع خواصها الكيميائية، حيث أن العدد الذري للعنصر هو الذي يحدد خواصه الكيميائية. ولذلك، فإنه لا يمكن فصل النظائر بالطرق الكيميائية وإنما يتم فصلها عن بعضها بطرق فيزيائية أخرى.

وبالنسبة للعناصر الخفيفة (أي ذات العدد الذري الصغير) يمكن أن يكون عدد النيوترونات مساوياً أو أكبر أو أقل من عدد البروتونات. أما بالنسبة للعناصر ذات الأعداد الذرية المتوسطة والكبيرة فيكون عدد النيوترونات أكبر عادة من عدد البروتونات.

ويزداد الفرق بين هذين العددين كلما زاد العدد الذري Z وتوضح نظائر اليورانيوم هذه الحقيقة، حيث يبلغ العدد الذري لليورانيوم92 في حين يتراوح العدد الكتلي بين حوالي 230، 240.

5-1 حجم وكتلة النواة The size and the mass of the nuclues

ورد أن نصف قطر النواة يكون عادة أصغر بكثير من نصف قطر الذرة، حيث يقل نصف قطر النواة عن نظيره للذرة بحوالي مائة ألف مرة. ويمكن النظر إلى نواة أي نظير على أنها مجموعة من النيوترونات والبروتونات متراصة بجوار بعضها في شكل كرة نصف قطرها R وبذلك يكون حجمها عبارة عن $4\pi R^3/3$. وبزيادة عدد البروتونات والنيوترونات في النواة (أي بزيادة العدد الكتلي A) يزداد حجم النواة. وقد وجد عملياً أنه يمكن إيجاد نصف قطر النواة (بالسنتيمتر) باستخدام العلاقة التالية:

$$R = 1.2 \times A^{1/3} \times 10^{-13} \text{ (cm)} \qquad (1\text{-}1)$$

وحيث أن A تتراوح بين 1 ، 240 لجميع النوى الموجودة في الطبيعة فإن نصف قطر أكبر نواة لا يتعدى 10^{-12}سم.

أما بالنسبة لكتلة النواة فقد ذكر أن العدد الكتلي A يحدد بالتقريب كتلة النواة. وفي الحقيقة فإن الكتلة الحقيقية للنواة تكون دائماً أقل من العدد الكتلي. فلكي تبقى النواة متماسكة ومترابطة فإنها تحتاج إلى طاقة تربط هذه المكونات ببعضها، وإلا تفككت النواة إلى مكوناتها الأولية. وتبعاً لعلاقة أينشتين بين الطاقة والكتلة فإن جزءاً من كتلة النواة يتحول إلى طاقة ترابط تؤدي إلى تماسك مكونات النواة مع بعضها. بذلك، تصبح الكتلة الفعلية للنواة أقل من مجموع كتل مكوناتها.

وقد استخدمت وحدة لقياس كتل النوى والذرات تعرف باسم وحدة الكتلة الذرية (atomic mass unit). ولقد اتفق عالمياً على اعتبار كتلة نظير الكربون 12 ($M(^{12}_{6}C)$ 12 مساوية 12 وحدة كتلة ذرية. وبالقياس على ذلك تكون كتلة نظير الهيدروجين $M(^{1}_{1}H)=1.007825$، وكتلة البروتون هي $M_P=1.007276$ ، وكتلة النيوترون هي $M_n=1.008665$ ، في حين أن كتلة الإلكترون هي $M_e = 0.0005486$ ، وذلك بوحدات الكتلة الذرية.

وهكذا، فإن وحدة الكتلة الذرية (amu) التي هي عبارة عن 12/1 من كتلة ذرة الكربون ($^{12}_{6}C$) تساوي كتلة مقدارها 1.6555×10^{-27} كجم.

6-1 الوحدات الذرية للطاقة Atomic units of energy

أثبت أينشتين أن الطاقة والمادة متكافئتان. بمعنى أن المادة يمكن أن تتحول إلى طاقة، والطاقة بدورها يمكن أن تتحول إلى مادة. وقد استنتج أينشتين العلاقة التي تربط بين المادة والطاقة عند حدوث التحول وهي العلاقة المعروفة باسم علاقة تكافؤ المادة والطاقة، وهي:

$$E_o = m_o C^2 \qquad (1\text{-}2)$$

حيث أن: E_o قيمة الطاقة بالجول، m_o كتلة المادة عند السكون بالكيلوجرامات، C سرعة الضوء بالمتر/ثانية ($C = 3 \times 10^8$ m/Sec)

وللتعبير عن الطاقة في المجالات الذرية والنووية تستخدم عادة وحدة صغيرة تعرف باسم وحدة الإلكترون – فولت eV unit. والإلكترون – فولت عبارة عن كمية الطاقة التي يكتسبها أو يفقدها إلكترون (أو بروتون) عند اجتيازه فرق جهد مقداره فولت واحد.

وحيث أن شحنة الإلكترون – 1.6×10^{-19} كولوم، نجد أن:

إلكترون – فولت واحد (eV) = 1.6×10^{-19} جول

ومضاعفات هذه الوحدة هي:

(KeV) كيلو إلكترون فولت = 10^{3} إلكترون فولت
= 1.6×10^{-16} جول.

(MeV) 1ميغا إلكترون فولت = 10^{6} إلكترون فولت
= 1.6×10^{-13} جول.

وإنه لمن المفيد ذكر بعض العلاقات الخاصة بالتحويل من وحدة الجول إلى بعض وحدات الطاقة الآتية:

1 سعر = 4.18 جول
1 كيلو واط . ساعة = 3.6×10^{6} جول

وباستخدام هذه العلاقات فإنه يمكن تحديد قيمة وحدة الكتلة الذرية سواءً بالجول أو بالإلكترون فولت، حيث نجد أن:

1 وحدة كتلة ذرية = 1.6555×10^{-27} (كجم)
$\times$ (3×10^{8} متر / ثانية)^{2}
= 1.49×10^{-10} جول
1 و ك ذ = 1.49×10^{-10} / 1.6×10^{-19}
= 931 ميغا إلكترون فولت

1-7 طاقة الترابط للنواة The nuclear binding energy

لما كانت النواة تحتوي على عدد معين من البروتونات الموجبة الشحنة فإنه تتولد بين هذه البروتونات داخل النواة قوى تنافر كهروستاتيكية، تتناسب تناسباً عكسياً مع مربع المسافات بينها. وحيث أن المسافات بين البروتونات في النواة صغيرة للغاية فإنه من المتوقع أن تكون قيمة قوى التنافر كبيرة للغاية، بحيث أن النواة لا تتكون، وإذا تكونت فإنها سرعان ما تتفكك. إلا أن بقاء النواة متماسكة يعني أن هناك

قوى أخرى للجذب أقوى من قوى التنافر المذكورة. وهذه القوى الجاذبة تعرف بالقوى النووية، وهي تؤثر بين كل من بروتون وبروتون، ونيوترون ونيوترون، وكذلك بين البروتون والنيوترون إذا وجدت هذه الجسيمات بجوار بعضها. وقد ثبت فيما بعد أن القوى النووية بين جميع هذه الجسيمات متكافئة مهما يكن نوعها. لذلك، فإنه من الناحية النووية (وليس من ناحية الشحنة) يمكن اعتبار كل من البروتون والنيوترون جسماً واحداً يطلق على أي منهما اسم نيوكلون (nucleon).

وهكذا، تجذب النيوكلونات بعضها بعضا ما دامت المسافة بين هذه النيوكلونات صغيرة (أقل من 10^{-13} سم). ويؤدي ذلك إلى ترابط هذه النيوكلونات وتكوين البناء المترابط والمعروف باسم النواة. ولكي تتفكك النواة إلى النيوكلونات المكونة لها فإنه يجب منحها كمية معينة من الطاقة، إذ أنه نتيجة لوجود طاقة الترابط تقل كتلة النواة عن مجموع كتل النيوكلونات المكونة لها. وهذا الفرق بين الكتلة الفعلية للنواة وبين مجموع كتل مكوناتها يشكل ما يسمى كتلة الترابط أو طاقة الترابط اللتان ترتبطان فيما بينهما بعلاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة.

أي أن كتلة الترابط للنواة تساوي مجموع كتل النيكلونات المكونة للنواة مطروح منها كتلة النواة الفعلية. وبالتالي نجد أن طاقة الترابط B هي:

$$B = (N M_n + Z M_p - M) C^2 \qquad (1\text{-}3)$$

حيث: M كتلة النواة الفعلية، M_n هي كتلة النيوترون، M_p هي كتلة البروتون و N عدد النيوترونات في النواة، Z عدد البروتونات فيها أي العدد الذري.

ولنحسب الآن طاقة الترابط لنواة الديتيريوم المكونة من بروتون ونيوترون، حيث أن كتلة الديتيريوم هي 2.013547 و ك ذ

$$B = 1 \times 1.008665 + 1 \times 1.007276 - 2.013547$$

$$= 0.002394 \text{ amu}$$

$= 0.002394 \times 931 = 2.23$ MeV

أي أن طاقة الترابط لنواة الديتيريوم هي 2.23 ميغا إلكترون فولت. وبقسمة هذه القيمة على عدد نيوكلونات النواة نجد أن طاقة الترابط للنيوكلون الواحد في نواة الديتيريوم هي 1.165 ميغا إلكترون فولت. وتعتبر قيمة طاقة الترابط للنيوكلون الواحد بمثابة مقياس لمدى تماسك واستقرار النواة . فكلما زادت هذه القيمة كانت النواة متماسكة ومستقرة، وكلما قلت هذه القيمة فإن هذا يعني أن النواة أكثر تفككاً وغير مستقرة.

وتجدر الإشارة إلى أن طاقة الترابط للنيوكلون الواحد للنوى الخفيفة (مثل نظائر الهيدروجين والهليوم والليثيوم) تكون عادة صغيرة ثم تزداد بزيادة العدد الكتلي، وتستمر ثابتة عند حوالي 8.5 ميغا إلكترون فولت لكل نيوكلون للنوى المتوسطة الكتلة، ثم تبدأ في الانخفاض من جديد للنوى الثقيلة (حوالي 7.5 ميغا إلكترون فولت لنواة اليورانيوم). وهذا هو السبب الذي يؤدي إلى انطلاق طاقة كبيرة عند انشطار اليورانيوم والعناصر الثقيلة الأخرى مثل الثوريوم، وانطلاق طاقة أكبر عند اندماج عناصر خفيفة مثل نظائر الهيدروجين.

1-8 مسائل وأسئلة للمراجعة

1- ارسم رسما تخطيطيا يمثل ذرات العناصر التالية
$^{14}_{6}C$, $^{9}_{4}Be$, $^{3}_{1}H$

2- ما هي كتلة الإلكترون بوحدات الكتلة الذرية وبوحدات الميغا إلكترون فولت؟

3- ماذا تعني كلمة نظير؟ مثل لما تقول.

4- أوجد نصف قطر نواة الراديوم 226، إذا اعتبرنا أن النواة على شكل كرة.

5- احسب طاقة الترابط لنواة الهيليوم 4 وطاقة الترابط لكل نيكلون في هذه النواة، إذا علمت أن كتلة نواة الهيليوم 4 هي 4.001506 و ك ذ.

6- احسب طاقة الترابط لنواة الأكسجين 16 وكذلك طاقة الترابط لكل نيكلون في هذه النواة، إذا علمت أن كتلة ذرة الأكسجين هي 15.994915 و ك ذ . (أهمل طاقة ترابط الإلكترونات في الذرة).

7- أيهما أكثر استقرارا نواة الأكسجين 16 أم الأكسجين 17 إذا علمت أن كتلة ذرة الأكسجين 17 هي : 16.999131 و ك ذ؟

8- احسب طاقة الترابط لنواة الكربون 12 بوحدات الكتلة الذرية والميغا إلكترون فولت إذا علمت أن كتلة ذرة الكربون 12 هي 12 و ك ذ.

الفصل الثاني

النشاط الإشعاعي والإشعاعات
Radioactivity and radiation

مقدمة – تفكك ألفا – تفكك بيتا – إشعاعات جاما – التفكك الإشعاعي– السلاسل الإشعاعية الطبيعية – النشاط الإشعاعي المستحث – وحدات قياس النشاط الإشعاعي – أسئلة ومسائل.

2–1 مقدمة

تتميز الكثير من النظائر – سواء الطبيعية أو الاصطناعية (أي المجهزة باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية)– بخاصية تعرف باسم النشاط الإشعاعي (radiaoactivity).

والنشاط الإشعاعي عبارة عن تفكك Decay (أو اضمحلال Disintegration) تلقائي لنواة النظير مع إصدار جسيمات نووية مثل جسيمات ألفا أو بيتا، قد يتبعها انطلاق إشعاعات جاما. وتعرف النظائر التي يحدث فيها هذا التفكك أو الاضمحلال بالنظائر المشعة. وتجدر الإشارة إلى أن عملية التفكك تحدث في النظائر سواء أكانت في صورة نقية أم تدخل ضمن مركبات كيميائية أو بيولوجية أو غيرها. كما أن عملية التفكك لا تعتمد إطلاقاً على الظروف الطبيعية مثل الحرارة وحالة النظير ..الخ.

2–2 تفكك ألفا α - decay

تتميز نوى العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) بانخفاض قيمة طاقة الترابط لكل نيوكلون في النواة. لذلك، فإن هذه النوى غير مستقرة، وتتفكك إلى نوى أخف وأكثر استقراراً. فعلى سبيل المثال، نجد أن نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ التي تتكون من 92 بروتونا، 146 نيوترونا تتفكك إلى نواة الثوريوم $^{234}_{90}Th$ المكونة من 90 بروتونا، 144 نيوترونا وينبعث نتيجة هذا التفكك جسيم ألفا α، الذي هو عبارة عن نواة الهليوم والمكون من بروتونين ونيوترونين. وتمثل عملية التفكك هذه بالمعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He\ (\alpha)$$

وهكذا، يتكون نتيجة تفكك نواة اليورانيوم نواة جديدة أكثر استقراراً هي نواة الثوريوم مع إصدار جسيم ألفا. كذلك، نجد أن نواة البولونيوم $^{214}_{82}Po$ تتفكك إلى نواة الرصاص $^{214}_{82}Pb$ مع إصدار جسيم ألفا، أي أن:

$$^{218}_{84}Po \longrightarrow {}^{214}_{82}Pb + \alpha$$

ولكي تكون النواة مشعة لجسيم ألفا يجب أن تكون كتلتها أكبر من مجموع كتلتي النواة الوليدة (daughter nucleus) وجسيم ألفا (يطلق اسم النواة الأم Parent nuvleus على النواة المشعة التي تتفكك، في حين يطلق اسم النواة الوليدة على النواة الناتجة عن التفكك). أي أنه كي تستطيع النواة الأم أن تتفكك بإصدار جسيم ألفا يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$M_p - (M_d + M_\alpha) > 0 \qquad (2\text{-}1)$$

حيث M_p كتلة النواة الأم، M_d كتلة النواة الوليدة، M_α كتلة جسيم ألفا. ولا يتحقق هذا الشرط إلا لنوى بعض العناصر الأثقل من الرصاص وعدد محدود جدا من العناصر الأخف من الرصاص. أما نوى العناصر الأخف فإنها تكون مستقرة بالنسبة لإصدار جسيمات ألفا.

وتجدر الإشارة إلى أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة. ولكن إذا تكونت النواة الوليدة في حالات مختلفة الإثارة فعندئذ تكون طاقات جسيمات ألفا مختلفة ولكنها ذات قيم محددة. فمثلاً

نجد أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير البولونيوم 210 تتخذ قيمة واحدة هي 5.305 ميغا إلكترون فولت. أما جسيمات ألفا الصادرة عن اليورانيوم 238 فتتخذ قيمتين هما 4.198 ميغا إلكترون فولت، 4.149 ميغا إلكترون فولت. ويعود السبب في ذلك إلى أن نواة الثوريوم 234 الوليدة قد تتكون في الحالة الأرضية فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأكبر للطاقة، وقد تتكون هذه النواة الوليدة في حالة مثارة فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأصغر للطاقة. ويمكن حساب طاقة جسيمات ألفا الصادرة من نظير معين وذلك باستخدام علاقة أينشتين لتكافؤ الكتلة والطاقة، حيث أن الطاقة E الناتجة عن التفكك هي:

$$E = \{ (M_p - (M_d + M_\alpha) \} C^2 \qquad (2\text{-}2)$$

وتتوزع هذه الطاقة بين جسيم ألفا والنواة الوليدة بنسب معاكسة لكتلتيهما وذلك طبقا لقانون بقاء الزخم (قانون بقاء كمية الحركة)، أي أن جسيم ألفا يحمل الجزء الأكبر من الطاقة الناتجة عن التفكك في حين تحمل النواة الوليدة جزءاً صغيراً جداً من هذه الطاقة. ويسهل حساب طاقة جسيمات ألفا E_α بدلالة طاقة التفكك E وكتلة النواة الوليدة M_d وكتلة النواة الأم M_p ، وذلك بتطبيق قانونا بقاء الزخم والطاقة الحركية، حيث يتبين أن:

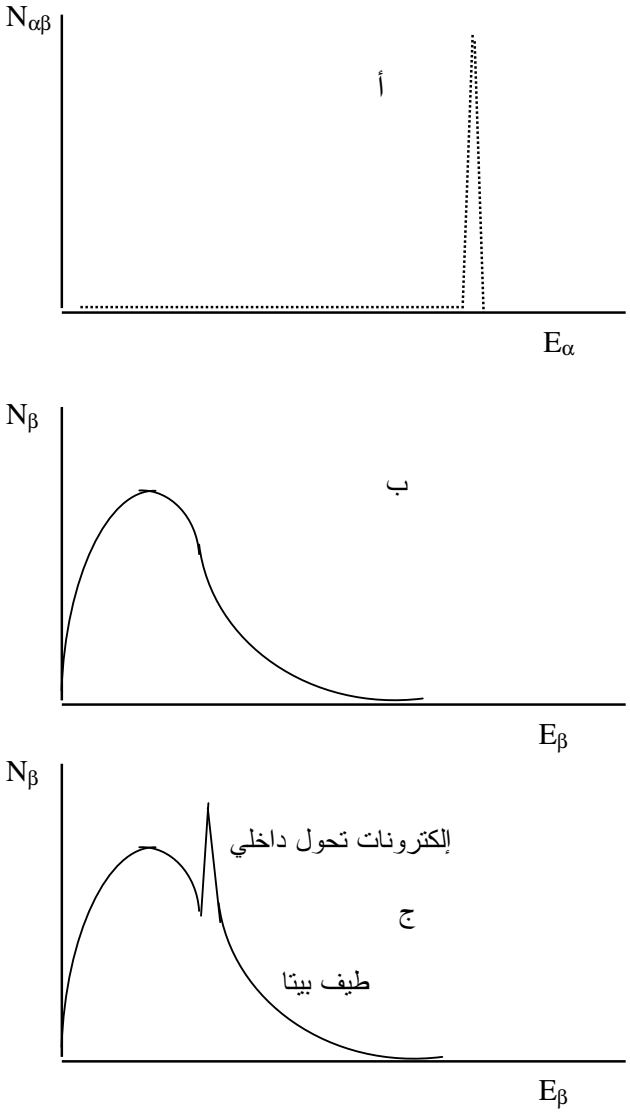
$$E_\alpha = (M_d / M_p) E \qquad (2\text{-}3)$$

وحيث أن كتل النوى ثابتة، وطاقة التفكك ثابتة بالنسبة لكل نواة تكون طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن النظير المعين واحدة عندما تتفكك النواة الأم إلى نواة وليدة في الحالة الأرضية، وقد تتخذ طاقات هذه الجسيمات قيما متعددة لكنها محددة عندما تتكوّن النواة الوليدة في حالات مثارة مختلفة. لذلك يقال أن طيف جسيمات ألفا هو طيف محدد الطاقات ويختلف من نظير لآخر، ويعتبر بصمة من البصمات التي تميز هذا النظير دون غيره. ويبين شكل (2–1أ) مخططا لمثل هذا الطيف.

2–3 تفكك بيتا β - decay

تصدر نوى بعض النظائر المشعة جسيمات أخرى تعرف باسم جسيمات بيتا (β - particles). وهذه الجسيمات عبارة عن إلكترونات أو

بوزيترونات. والبوزيترون (positron) عبارة عن جسيم كتلته مساوية تماما لكتلة الإلكترون ولكن شحنته موجبة. ويحدث هذا النوع من التفكك (المعروف باسم تفكك بيتا) للنوى في كثير من النظائر سواء أكانت ثقيلة أم خفيفة.



شكل (2–1): أ– طيف ألفا ب– طيف جسيمات بيتا
ج– طيف جسيمات بيتا + إلكترونات تحول داخلي

فمن المعروف أنه كي يكون النظير مستقراً بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا يجب أن تكون النسبة بين عدد النيوترونات والبروتونات (أي N/Z) في نواة هذا النظير نسبة معينة تتراوح بين 1 بالنسبة للنظائر الخفيفة وتزداد حتى تصل إلى حوالي 1.6 بالنسبة للنظائر الثقيلة. فمثلاً يلاحظ أن نواة نظير الكربون 12 ($^{12}_{6}C$) مستقرة حيث أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات فيها هي N/Z = 6/6 = 1. وتعتبر هذه النواة من النوى الخفيفة. أما نواة نظير الكربون 14($^{14}_{6}C$) فهي نواة غير مستقرة حيث إن هذه النسبة تصبح:

$$N / Z = 8/6 = 1.33$$

كذلك، يلاحظ أن نواة نظير السيزيوم 133 ($^{133}_{55}Cs$) مستقرة لأن النسبة تصبح 1.42 في حين أن نواة نظير السيزيوم 137($^{137}_{55}Cs$) غير مستقرة لأن النسبة تصبح 1.49. ويوضح شكل (2–2) منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا. وهذا المنحنى عبارة عن العلاقة بين عدد النيوترونات N وعدد البروتونات Z للنظائر المستقرة. فإذا كانت النسبة بين عدد البروتونات والنيوترونات للـــنظير المعـــين واقعة على منحنى الاستقرار كان النظير مستقراً بالنسبة لتفكك بيتا. وأما إذا خرجت هذه النسبة عن المنحنى فإن النظير يكون نشطاً بالنسبة لهذا التفكك.

كذلك، يمكن أن يكون النظير المعين مستقراً بالنسبة لتفكك ألفا ولكنه غير مستقر بالنسبة لتفكك بيتا والعكس صحيح. فمثلاً تعتبر نواة اليورانيوم 238 مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا (أي أنها لا تتفكك مصدرة جسيم بيتا)، ولكنها غير مستقرة بالنسبة لتفكك ألفا (أي تتفكك مع إصدار جسيم α) . ونتيجة لإصدارها جسيم α تتكون نواة جديدة هي الثوريوم 234. وعند حساب النسبة N/Z لليورانيوم 238 نجدها:

$$N / Z = 146 / 92 = 1.587$$

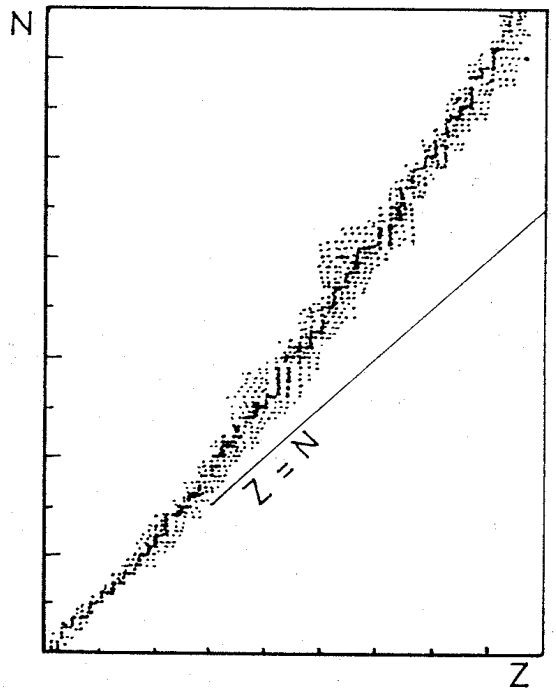
أما بالنسبة للثوريوم 234 نجد أن النسبة هي:

$$N / Z = 144 / 90 = 1.60$$

أي أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات خرجت عن منحنى الاستقرار. لذا، نجد أن نواة الثوريوم تصبح غير مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا مع إصدار جسيم بيتا. ويعبر عن هذا التفكك كالتالي:

$$^{234}_{90}\mathrm{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + \beta^-$$

أي أن نواة الثوريوم 234 تتفكك إلى نواة بروتكتينيوم 234 مع إصدار جسيم بيتا سالب (إلكترون). ويلاحظ أنه نتيجة لهذا التفكك زاد عدد البروتونات داخل النواة بمقدار بروتون واحد، في حين قل عدد النيوترونات بمقدار نيوترون واحد فتصبح نسبة N/Z في البروتكتينيوم هي 1.571 ، وهي تحقق الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا.



شكل (2-2)
منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا

2-3-1 أنواع تفكك بيتا Types of β-decay

أ- التفكك الإلكتروني The electron decay

يلاحظ أن إصدار إلكترون من النواة ناتج عن تحول نيوترون من نيوترونات النواة إلى بروتون، وذلك كي تصبح النسبة بين النيوترونات والبروتونات هي نسبة الاستقرار. ويعبر عن هذا التفكك كالآتي:

$$^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + \beta^{-}$$

ومن أمثلة التفكك الإلكتروني تفكك الكوبلت 60 (^{60}Co) إلى النيكل 60 (^{60}Ni) وتفكك السيزيوم 137 (^{137}Cs) إلى الباريوم 137 (^{137}Ba).

ب- التفكك البوزيتروني The positron decay:

في بعض الأحيان تكون نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النظير المعين أقل من النسبة التي تحقق الاستقرار. وفي هذه الحالة يتحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون، وينطلق نتيجة لذلك التحول بوزيترون يحمل شحنة البروتون الموجبة. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالتفكك البوزيتروني، ويعبر عنه كالآتي:

$$^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+}$$

ومن أمثلة التفكك البوزتروني تفكك الصوديوم 22 (^{22}Na) إلى النيون 22 (^{22}Ne).

ج- الأسر الإلكتروني The electron capture

يمكن أن يحدث تحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون بطريقة أخرى بخلاف المذكورة في التفكك البوزتروني. ويتم ذلك بأن تأسر النواة إلكتروناً من الإلكترونات المدارية القريبة من النواة (أي من المدار K وفي أحيان قليلة من المدار L) ويتحد هذا الإلكترون المأسور مع أحد بروتونات النواة فيتكون النيوترون دون إصدار جسيم بيتا. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالأسر الإلكتروني ويعبر عنه كالآتي:

$$^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n$$

وهكذا فإنه يوجد ثلاثة أنواع لتفكك بيتا هي التفكك الإلكتروني (β^-) والبوزيتروني (β^+) والأسر الإلكتروني (electron capture). وفي حالة الأسر الإلكتروني لا تصدر النواة أيا من جسيمات بيتا.

ولقد ثبت فيما بعد أنه عند حدوث أي نوع من تفكك بيتا ينطلق من النواة جسيمات تعرف باسم النيوترونيو (neutrino) – ν (نيو) . والنيوترينو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة وكتلة السكون له مساوية للصفر (أي $m_\nu=0$) . وعلى هذا يمكن التعبير عن الأنواع الثلاثة لتفكك بيتا كالآتي:

(تفكك إلكتروني) $\quad {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}P + \beta^- + \nu'$

(تفكك بوزيتروني) $\quad {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^+ + \nu$

(أسر إلكتروني) $\quad {}^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \nu$

ويعرف ν' باسم النيوترينو المضاد(anti - neutrino). وعموما، يعرف الجسيم المضاد على أنه هو الذي إذا تلاقى مع جسيمه عند تحركهما بسرعة محدودة نسبيا فإنهما يفنيان معا ككتلة مادية وينتج عن هذا الفناء طاقة في شكل إشعاعات كهرومغناطيسية (إشعاعات جاما أو أشعة سينية).

ويمكن معرفة ما إذا كان النظير المعين مستقرا أو غير مستقر بالنسبة لأي نوع من تفكك بيتا. فإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z}M > (\,^{A}_{Z+1}M + m_e) \qquad (2\text{-}4)$$

حيث $^{A}_{Z}M$ ، $^{A}_{Z+1}M$ ، m_e هي كتل النواة الأم والنواة الوليدة والإلكترون بالترتيب، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار الإلكترونات. وإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z}M > (\,^{A}_{Z-1}M + m_e) \qquad (2\text{-}5)$$

حيث $^{A}_{Z-1}M$ ، هي كتلة النواة الوليدة في حالة التفكك البوزيتروني، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات. وأخيراً فإنه لكي تكون النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني يجب أن يتحقق الشرط:

$$(m_e + {}^{A}_{Z}M) > {}^{A}_{Z-1}M \qquad (2\text{-}6)$$

فإذا تحقق الشرط (2–5) نجد أن الشرط (2–6) قد تحقق هو الآخر. لذلك، فإن أي نواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات تكون في الوقت نفسه نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني. لذلك، فإن التفكك البوزيتروني يصاحبه دائماً نسبة معينة من الأسر الإلكتروني والعكس غير صحيح. فإنه يمكن أن يتحقق الشرط (2–6) دون أن يتحقق الشرط (2–5). عندئذ، نجد أن النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني ولكنها غير نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات.

2–3–2 طاقة جسيمات بيتا Energy of β- particles

ذكرنا أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة أو قيما محددة للطاقة. وأما بالنسبة لجسيمات β الصادرة عن نفس النظير فإن طاقاتها يمكن أن تتخذ أي قيم للطاقة، اعتبارا من الصفر وحتى قيمة قصوى معينة لكل نظير. ويرجع السبب في ذلك إلى أنه بالإضافة إلى جسيم بيتا الصادر عن النظير المشع يَصدر جسيم آخر هو النيوترينو المضاد أو النيوترينو. فطاقة تفكك بيتا الناتجة بالنسبة للتفكك الإلكتروني تكون ثابتة، ويمكن تحديدها بالعلاقة:

$$E = \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z+1}M + m_e)\} C^2 \qquad (2\text{-}7)$$

وفي حالة التفكك البوزيتروني تكون الطاقة الناتجة من التفكك ثابتة كذلك وهي:

$$E= \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z-1}M + m_e)\} C^2 \qquad (2\text{-}8)$$

وتتوزع طاقة التفكك في كلتا الحالتين بين الجسيمين الناتجين وهما الإلكترون والنيوترينو المضاد في حالة التفكك الإلكتروني، أو بين البوزيترون والنيوترينو في حالة التفكك البوزيتروني. وفي حالة الأسر الإلكتروني تكون الطاقة الناتجة عن التفكك ثابت أيضا للنظير المعين وهي:

$$E = ({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z-1}M)\, C^2 \qquad (2\text{-}9)$$

وتوزيع الطاقة بين الجسيمين الناتجين عن كل تفكك غير محـــدد بنسبة معينة. فقد تكون طاقة النيوترنيو المضاد قريبة جدا مـــن الصـــفر وبذلك يحمل الإلكترون (في التفكك الإلكتروني) كل طاقة التفكك وتعرف طاقة الإلكترون عندئذ بالطاقة القصوى للتفكك أو طاقة نقطـــة النهايـــة (end point). وقد يحمل النيوترنو المضاد جزءا أكبر من طاقة التفكـــك فيحمل الإلكترون الجزء الباقي من هذه الطاقـــة. كـــذلك، قـــد يحمـــل النيونرينو المضاد طاقة التفكك كلها فتكون طاقة الإلكترون قريبـــة مـــن الصفر. وعند قياس طاقة الإلكترونات الصادر عن عدد كبير جدا مـــن النوى المشعة ورسم العلاقة بين عدد الإلكترونات ذات الطاقة المعينـــة وبين طاقاتها يمكن الحصول على طيف جسيمات بيتا الذي يمثله منحنى شبيه بالمبين في شكل (2-1ب).

ويعرف هذا المنحنى باسم طيف أشعة بيتا وهو يوضح أن طاقة جسيمات بيتا الصادرة عن نظير معين يمكن أن تتخذ أية قيمة، ابتداءً من الصفر وحتى أقصى قيمة وهي قيمة طاقة التفكك أو ما يعـــرف باســـم نقطة النهاية. لذا، فإنه يقال أن طيف جسيمات بيتا عبارة عـــن طيـــف مستمر على عكس طيف جسيمات ألفا الذي يتخذ قيمة واحـــدة أو قيمـــا محددة.

2-4 إشعاعات جاما Gamma radiation

في اغلب الأحيان تكون النوى الوليدة الناتجة عن تفكك ألفـــا أو تفكك بيتا (أوالنوى الناتجة عن أية عملية نووية أخـــرى كالتفـــاعلات النووية في حالة مثارة أو متهيجة excited state). ويعني هذا أن طاقـــة مكونات النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة الأرضية (المســـتقرة)، أي أن كتلة النواة في الحالة المثارة تكون أكبر من كتلتها فـــي الحالـــة الأرضية (ground state). عندئذ، تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة أو إلى الحالة الأرضية للتخلص من طاقـــة الإثـــارة، وذلـــك بإصدار إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات جامـــا. كمـــا يمكن أن تتخلص النواة من طاقة الإثارة بتجميع هـــذه الطاقـــة الزائـــدة

وتركيزها على أحد الإلكترونات المدارية (خاصة المدار K لقربه من النواة) فينطلق هذا الإلكترون تاركا الذرة وحاملا معه قيمة محددة من الطاقة. وتعرف هذه العملية باسم التحول الداخلي (internal conversion)

وتجدر الإشارة إلى أن إزالة الإثارة عن طريق إصدار إشعاعات كهرومغنيطيسية (إشعاعات جاما) يمكن أن يحدث بانتقال النواة من الحالة المثارة مباشرة إلى الحالة الأرضية. كذلك، يمكن أن يحدث الانتقال على مراحل كأن تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة ثم إلى حالة أقل ... وهكذا، إلى أن تصل النواة للحالة الأرضية. فعلى سبيل المثال، فإنه عند حدوث تفكك بيتا لنواة الصوديوم 22 سواءً عن طريق التفكك البوزيتروني أو عن طريق الأسر الإلكتروني تتكون نواة عنصر جديد هو النيون 22، وفقا للتفكك البوزتروني التالي:

$$^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{10}Ne^{*} + \beta^{+}$$

أو وفقا لتفكك الأسر الإلكتروني:

$$e^{-} + {}^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{20}Ne^{*}$$

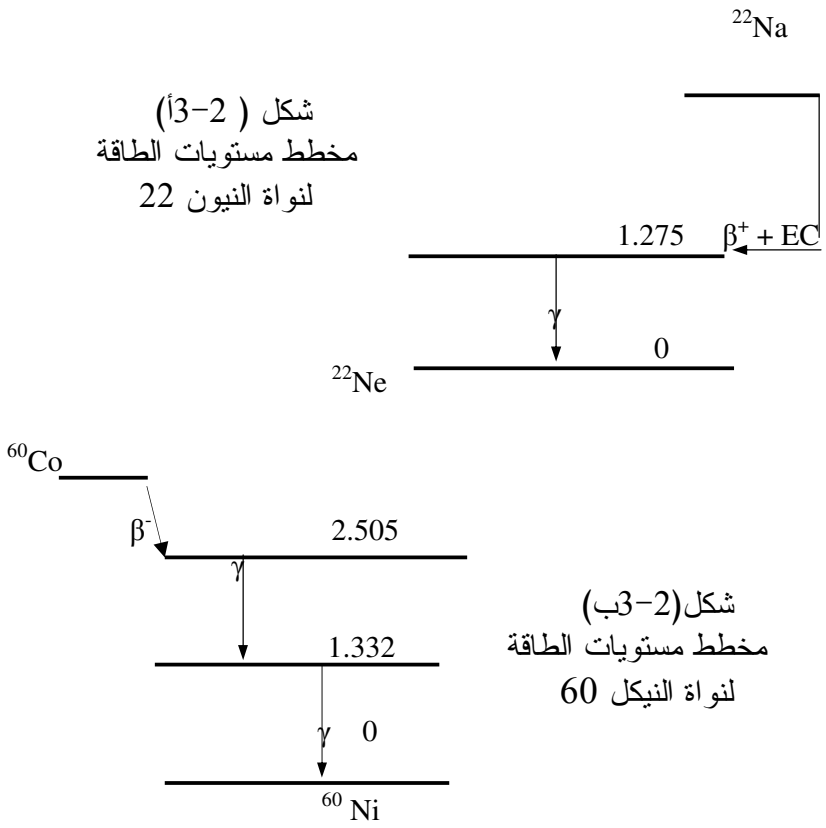
والعلامة * معناها أن نواة النيون في حالة مثارة، حيث يتكون النيون 22 في نمطي التفكك في حالة مثارة بطاقة إثارة مقدارها 1.275 ميغا إلكترون فولت. ثم تضمحل نواة النيون 22 من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية مع إصدار إشعاع جاما (فوتون جاما) طاقته مساوية لطاقة الإثارة. ويبين شكل (2–3أ) مخططا لهذه العملية.

ويمثل مخطط تفكك واضمحلال الكوبالت 60 (شكل2–3ب) مثالا للتحول من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية على مراحل . فعند تفكك نواة الكوبالت 60 وإصدار الإلكترون تتحول إلى نواة نيكل60 لمعادلة التفكك البيتاوي التالية:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni^{*} + \beta^{-} + \upsilon$$

وتكون نواة النيكل في الحالة المثارة الرابعة بطاقة إثارة مقدارها 2.505 ميغا إلكترون فولت. فتنتقل (تضمحل) نواة النيكل 60 من هذه الحالة إلى الحالة المثارة الأولى مباشرة بطاقة إثارة أقل وهي 1.332

ميغا إلكترون فولت مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.173 ميغا إلكترون فولت (أي تساوي فرق الطاقة بين الحالتين المثارتين). ثم تنتقل



شكل (2−3أ)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيون 22

شكل(2−3ب)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيكل 60

نواة النيكل من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأرضية مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.332 ميغا إلكترون فولت. وبصفة عامة تكون طاقة فوتون جاما E_γ نتيجة انتقال النواة من حالة مثارة ابتدائية i إلى حالة نهائية f أقل إثارة مساوية للفرق بين طاقتي الحالتين وتحدد بالعلاقة:

$$E_\gamma = E_i - E_f = h\nu$$

حيث E_i ترمز لطاقة الحالة الابتدائية للنواة، E_f ترمز لطاقة الحالة النهائية، h هو ثابت بلانك ($h = 6.63x10^{-34}$ جول.ثانية)، ν تردد الفوتون.

2-4-1 التحول الداخلي The internal conversion

سبق الإشارة إلى أنه في بعض الأحيان ينتج عن اضمحلال جاما انطلاق أحد إلكترونات القشرات K أو L أو M الذرية دون أن يخرج فوتون جاما المنبعث من النواة خارج الذرة. في هذه الحالة لا يسجل فوتون جاما كناتج لاضمحلال جاما وإنما يسجل إلكترون بطاقة محددة تساوي طاقة فوتون جاما مطروحا منها طاقة ترابط الإلكترون في القشرة المحددة.

وتعرف الإلكترونات المنطلقة من القشرة K أو L أو M نتيجة لاضمحلال جاما للنواة بإلكترونات التحول الداخلي وتظهر هذه الإلكترونات في صورة خط طيفي رفيع محدد الطاقة للإلكترونات فوق طيف الإلكترونات الناتجة عن تفكك بيتا شكل (2-1ج). فعلى سبيل المثال يتفكك الذهب 198 من خلال تفكك بيتا السالب إلى الزئبق 198 في حالته المثارة الأولى، بصفة أساسية، بطاقة إثارة 412 ك إ ف. وعند اضمحلال الزئبق 198 إلى الحالة الأرضية ينطلق فوتون جاما حاملا فرق الطاقة وهو 412 ك إ ف. ويمكن أن يتفاعل هذا الفوتون عند انطلاقه مع أحد الإلكترونات المدارية القريبة من النواة مثل إلكترونات القشرة K أو L أو M فيمنحه كل طاقته (راجع الفصل الثالث) فيستهلك الإلكترون جزءا من هذه الطاقة على فك ترابطه بالنواة وينطلق حاملا الجزء الباقي من الطاقة، وتعرف العملية عندئذ بالأثر الكهروضوئي الداخلي أي في نفس الذرة التي انطلق منها الفوتون.

كذلك، يمكن أن تنطلق طاقة الإثارة من النواة لأحد الإلكترونات مباشرة دور انطلاق فوتون جاما بشرط أن يكون هذا الإلكترون قريبا من النواة أي من الإلكترونات التي تنتمي للقشرة K أساسا، وأحيانا للقشرة L ،وأحيانا نادرة للقشرة M. ويعرف اضمحلال النواة، عندئذ،

بأنه اضمحلال جاما من خلال إلكترونات التحول الداخلي .ولا تختلف طاقة هذه الإلكترونات الناتجة عن التحول الداخلي عن طاقة إلكترونات الأثر الكهرضوئي للفوتون المنطلق من النواة. لذلك يستحيل فصل إلكترونات التحول الداخلي عن إلكترونات الأثر الكهروضوئي الداخلي . وتكون طاقتهم هي

$$E_e = E_\gamma - Be$$

حيث E_e طاقة الإلكترون المنطلق، E_γ طاقة فوتون جاما أو فرق طاقتي الإثارة الذي حدث الإضمحلال بينما،B_e طاقة الترابط للإلكترون.

وفي حالة الزئبق 198 تكون طاقة ترابط الإلكترون في القشرة K هي 83 ك إ ف. بذلك تكون طاقة إلكترونات التحول من هذه النواة هي:

$$E_e = 412 - 83 = 329 \quad KeV$$

وذلك بالنسبة للإلكترونات المنطلقة من القشرة K . أماعند انطلاق الإلكترونات من القشرة L (وهو الحتمال الأصغر)، وحيث أن طاقة ترابط الإلكترون في هذه القشرة للذهب تبلغ حوالي8.9 ك إ ف، تكون طاقة إلكترونات التحول الداخلي من القشرة L هي:

$$E_e = 412 - 8.9 = 403.1 \quad KeV$$

وهذان الخطان من الإلكترونات وحيدة الطاقة يظهران عادة فوق الطيف المستمر لجسيمات بيتا.

وعند انطلاق أحد إلكتروني القشرة K (أو أي من الإلكترونات الثمانية للقشرة L فإنه يترك مكانه فارغا، ويقال عندئذ أن هناك فجوة في القشرة K أو L أو حتى M . وبالتالي، تبدأ الإلكترونات الموجودة في المدرات الأبعد من النواة بشغل هذه الفجوة، ويحدث نتيجة لذلك انطلاق أشعة سينية تحمل فرق الطاقة بين المستويين كما سيرد لاحقا.

ويعرف الاحتمال النسبي لحدوث التحول الداخلي من القشرة K α_k على أنه نسبة عدد الإلكترونات المنطلقة من القشرة K إلى عدد

فوتونات جاما المنبعثة من نفس العينة من هذه النوى. وعموما، تتغير قيمة معامل التحول الداخلي α_k بين صفر ، 1 وتزيد قيمته عموما بزيادة العدد الذري Z للنواة. وتحدد معاملات التحول الداخلي بالنسبة للقشرات L ، M بنفس الأسلوب إلا أن هذه المعاملات تقل كثيرا بالنسبة لمعاملات القشرة K .

وهكذا، نجد أن هناك العديد من النظائر التي تتميز بنشاط إشعاعي طبيعي. وتتفكك هذه النظائر مصدرة إما جسيمات ألفا أو بيتا أو كليهما معا، وقد يتبع ذلك مباشرة أو خلال فترة زمنية معينة انطلاق إشعاعات جاما نتيجة اضمحلال النويات الوليدة من الحالات المثارة إلى حالات أقل إثارة أو إلى الحالةالأرضية.

2-5 الأشعة السينية X - rays

تصدر الأشعة السينية عن الذرة بخلاف جسيمات ألفا وبيتا وإشعاعات جاما التي تصدر عن النواة. ويجب التفريق بين نوعين مختلفين من الأشعة السينية يختلفان من حيث أسلوب توزع طاقة الأشعة وهما:

2-5-1 الأشعةالسينية المميزة للعنصر

يصدر هذا النوع من الأشعة السينية عند انتقال الإلكترونات الذرية من مدارات (قشرات) ذات طاقة أعلى إلى مدارات ذات طاقة أقل في الذرة نفسها. فعند وجود فجوة إلكترونية في مدار ذي طاقة أقل ينتقل أحد الإلكترونات من مدار ذي طاقة أعلى ليشغل هذه الفجوة، وينطلق في اللحظة نفسها فوتون أشعة سينية (موجة كهرومغناطيسية) حاملاًفرق طاقتي الإلكترون في المدارين. ولما كانت قيم طاقات الإلكترونات في المدارات الذرية محددة وثابتة للعنصر الواحد وتختلف من عنصر لآخر، فإنه تتخذ فوتونات الأشعة السينية المنطلقة نتيجة لانتقال الإلكترونات بين المدارات قيما محددة وثابتة للطاقة بالنسبة للعنصر الواحد، وتختلف هذه القيم باختلاف العنصر. وهذا يعني أنه عند إثارة الإلكترونات في مدارات ذرات العنصر الواحد بأي أسلوب من

أساليب الإثارة تصدر ذرات هذا العنصر (لحظة التخلص من الإثـــارة) فوتونات سينية ذات طاقات محددة ومعلومة ومميزة للعنصـــر. ويطلـــق علىهذه الأشعة اسم الأشعة السينية المميزة للعنصر وتعد بصـــمة مـــن بصماته، وتستخدم عادة في عمليات التحليل الكمي والكيفي للعناصر.

وتوسم الأشعة السينية المميزة للعنصر المعين بمنحهـــا نفـــس الرمز الخاص بالقشرة التي ينتقل إليها الإلكترون. فعلى سبيل المثـــال، فإنه عند انتقال الإلكترون من القشرة L إلى القشرة K توسم هذه الأشعة بالحرف K . أما عند انتقال الإلكترون من القشرة M إلـــى القشـــرة L فتوسم الأشعة السينية بالحرف L . ولا يقتصر التوسيم على ذكر رمـــز القشرة التي ينتقل إليها الإلكترون وإنما يؤخذ فـــي الحســـبان، كـــذلك، المستويات الفرعية لنفس القشرة التي يتم الانتقال منها وكذلك المستويات الفرعية التي يتم الانتقال إليها. فعندالانتقال من القشرة الفرعيـــة الأبعـــد (أي الأعلى طاقة) وهي القشرة L_3 إلى القشرة K توسم بـــالرمز $K_{\alpha 1}$ ، والأشعة المميزة للانتقال من القشرة الفرعية L_2 إلى القشرة K توســـم بالرمز $K_{\alpha 2}$. ويبين شكل (2-4) مخططا للقشرات الفرعية (المـــدارات الفرعية للإلكترونات) ولتوسيم الأشعة الـــــسينية النـــــاتجةعن انتقـــال الإلكترونات بين هذه القشرات.

مثال:

إذا علمت أن طاقـــة تـــرابط الإلكترونـــات فـــي مـــدارات ذرة الرصاص هي كالمبينةفي الجدول التالي. فما هي طاقة أهـــم الخطـــوط الطيفية للأشعة السينية المميزة للرصاص.

القشرة	K 1S1/2	L1 2S1/2	L2 2P1/2	L3 2P3/2	M1 2S1/2	M2 2P1/2	M3 2P3/2
طاقة الترابط ك.ف	88.005	15.861	15.200	13.035	30851	30554	3.066

الحل:

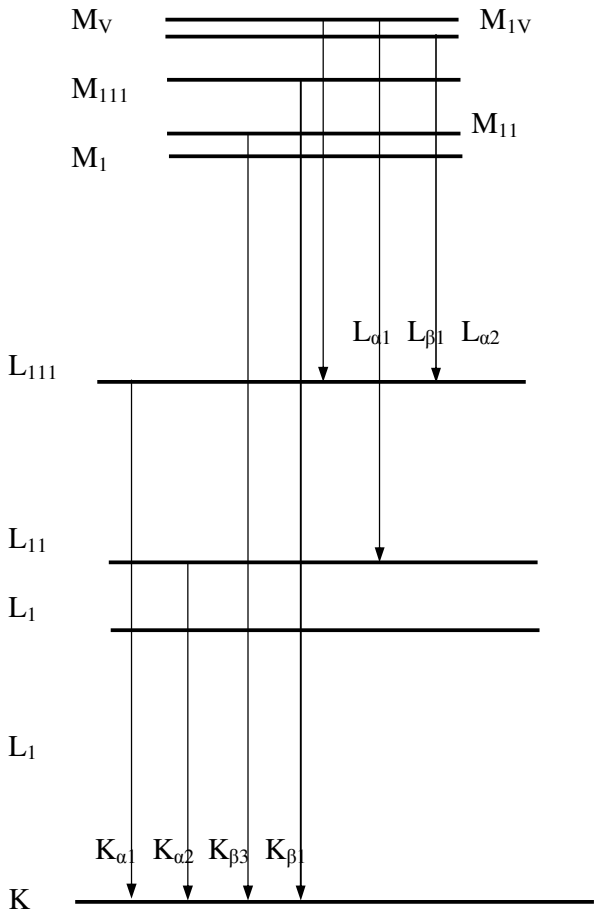
من المعروف أن $K_{\alpha 1}$ تنتج عن انتقال الإلكترون من القشرة الفرعية L_3 إلى القشرة K . بذلك تكون طاقة الأشعة السينية من الرصاص $_{82}Pb$ هي:

$K_{\alpha 1}$ (L_3 –> K) = 88.005 – 13.035 = 74.97 KeV

$K_{\alpha 2}$ (L_2 –> K) = 88.005 – 15.200 = 72.805 KeV

$K_{\beta 1}$ = (M_3 –> K) = 88.005 – 3.066 = 84.939 KeV

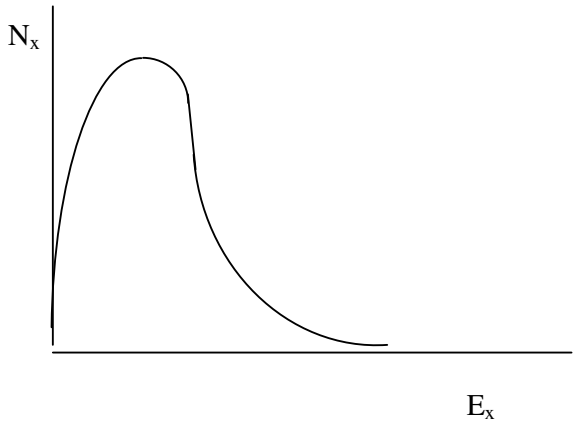
$K_{\beta 2}$ = (M_2 –> K) = 88.005 – 3.554 = 84.451 KeV



شكل (2–4)
القشرات والقشرات الفرعية للإلكترونات في الذرة وخطوط الأشعة الشينية المنبعثة عند انتقال الإلكترونات من القشرات الأعلى للأدنى

2–5–2 الأشعة السينية الانكباحية

عند حدوث انكباح شديد (أي تناقص شديد في السرعة) للإلكترون، أو لأي جسيم مشحون سريع بصفة عامة، بسبب تفاعل هذا الإلكترون أو الجسيم المشحون مع المجال الكهربائي الشديد للذرة أو للنواة تنطلق الطاقة التي يفقدها الإلكترون (أو الجسيم المشحون) بسبب تناقص سرعته في صورة فوتون أشعة سينية يحمل فرق طاقة الإلكترون أو الجسيم قبل وبعد التفاعل. وتسمى الأشعة المتولدة بهذا الأسلوب بالأشعة السينية الانكباحية. ويتميز طيف الأشعة الانكباحية شكل (2–5) بأنه طيف مستمر، أي تتخذ طاقة الفوتونات قيما مختلفة تبدأ من الصفر وتنتهي عند أقصى قيمة لطاقة الإلكترون أو الجسيم المنكبح. ومن أمثلة الأشعة السينية الانكباحية تلك الأشعة التي يتم توليدها في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة في التشخص الطبي وفي التطبيقات الصناعية المختلفة، حيث يتم تعجيل الإلكترونات باستخدام فرق جهد كبير ثم تكبح الإلكترونات المعجلة علىمادة المصعد (الأنود) فتنطلق الأشعة الانكباحية.



شكل (2–5): طيف الأشعة السينية الانكباحية

2-5-3 إلكترونات أوجر Auger electrons

في الفقرة (2-5-1) السابقة ورد أنه عند حدوث فجوة (أي فراغ إلكتروني) في إحد القشرات K أو L أو M فإنه يقال أن الذرة مثارة وأنها تعود إلى حالتها غير المثارة بهبوط أحد الإلكترونات من المدار الأعلى ليشغل هذه الفجوة أو بهبوط عدد من الإلكترونات من مدارات أعلى إلى مدارات أدنى لشغل جميع المدارات الأدنى بالعدد المقنن لها من الإلكترونات. وورد أن ذلك يترتب عليه انطلاق أشعة سينية مميزة تكون طاقة الفوتون لكل منها مساوية تماما لفرق طاقتي القشرتين.

إلا أنه لايحدث في بعض الأحيان انطلاق للفوتون. فعلى سبيل المثال لوحظ أنه عند وجود فجوة في القشرة K يمكن أن يهبط إلكترون من القشرة L ليشغل الفراغ الموجود في القشرة K ، عندئذ تتكون الفجوة في القشرة L مع انطلاق فوتون أشعة سينية مميزة. إلا أنه قد لايحدث بعد ذلك هبوط إلكترون من قشرة أعلى لشغل الفجوة في القشرة L. وإنما يلاحظ انطلاق إلكترون آخر من القشرة التالية M ، بدلا من فوتون الأشعة السينية. وبهذا تكون فجوة ثانية في القشرة M. ويطلق على الإلكترون المنطلق من القشرة M إلكترون أوجر. ويحمل هذاالإلكترون طاقة E_e تساوي:

$$E_e = h\nu - E_M$$
$$= E_K - E_L - E_M$$

حيث $h\nu$ طاقة الفوتون الذي ينبغي أن ينطلق عند الانتقال من القشرة L إلى القشرة K.

وجدير بالذكر أن هذه العملية تشبه تماما عملية التحول الداخلي الذي يتمخض عن انطلاق إلكترونات مدارية بدلا من فوتونات جاما المنبعثة من النواة. إلا أن إلكترون أوجر يعني تحول فوتون أشعة سينية إلى إلكترون وعدم انطلاق الفوتون وانطلاق إلكترون بدلا منه. ويطلق على إلكترون أوجر في هذه الحالة إلكترون KLM ، لأنه بدأ بوجود

فجوة في القشرة K وانتهت العملية إلى انطلاق إلكترون من القشـــرة M بدلا من الفوتون الناتج عن انتقال الإلكترون من القشرة M إلى القشرة L

وتجدر الإشارة إلى إمكانية انطـــلاق إلكترونـــات أوجـــر مـــن مستويات أعلى وتسمى عندئذ بثلاثة أحرف يمثل أيسرها القشرة الاقرب الى النواة التي تكونت فيها الفجوة وأيمنها القشرة التـــي انطلـــق منهـــا إلكترون مثل K L M أو غيرها.

ويبقى تعريف احتمال حدوث انطلاق إلكترونات أوجر ω_K على أنه النسبة بين عدد فوتونات الأشعة السينية المنطلقة من القشرة K إلى عدد الفجوات المتكونة في القشرة K .

6–2 التفكك الإشعاعي The radioactive decay

يعتبر التفكك الإشعاعي مع إصدار حسيم ألفا أو بيتا أو إشعاعات جاما عملية إحصائية خاضعة لقوانين الفيزياء الإحصائية، حيث أنه ليس بالإمكان توقع النواة أو النوى التي يمكن أن تتفكك في لحظـــة معينـــة. ويمكن إيجاد القانون الذي تتفكك بموجبه النوى انطلاقا مـــن النظريـــة الإحصائية.

2–6–1 قانون التفكك الإشعاعي The radioactive decay law

نفرض أن (لامدا) هو عبارة عن احتمال تفكك نواة معينة فـــي ثانية واحدة، وأن هذا الاحتمال صغير جدا، أي أن:

$$0 < \lambda << 1$$

معنى ذلك أن احتمال تفكك هذه النواة خلال زمن قصير مقداره dt هـــو (λ dt) . فإذا كان عدد النوى النشطة التي لم تتفكك بعد هو N فهذا يعني أن احتمال التفكك لكل هذا العدد من النوى خلال الزمن dt هو $N \lambda dt$. أي أن عدد النوى الذي يمكن أن يتفكك خلال هذا الزمن هو:

$$dN = - N \lambda dt$$

وتعني الإشارة السالبة أن عدد النوى N المتبقي دون تفكك يقل كلما زاد الزمن. وبقسمة طرفي هذه المعادلة الأخيرة على العدد N وأخذ تكامل الطرفين مع اعتبار أن عدد النوى النشطة عند الزمن $t = 0$ هو N_0 نجد أن :

$$N(t) = N_0 \, e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}10)$$

حيث، N(t) هو عدد النوى النشطة المتبقية دون تفكك حتى اللحظة t . وتعرف هذه العلاقة **بقانون التفكك الإشعاعي**، وتعرف الكمية λ **بثابت التفكك** (أو الاضمحلال)

2-6-2 الشدة الإشعاعية للعينة The sample activity

في معظم الأحيان يكون المطلوب هو معرفة عدد النوى A(t) التي تتفكك في الثانية، وليس عدد النوى المتبقية دون تفكك والمحددة بالعلاقة (2-10). ويعرف عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة من أي عينة مشعة باسم الشدة الإشعاعية لهذه العينة أو نشاطها الإشعاعي (Activity of a Sample). ويسهل تحديد هذه الشدة وذلك بتفاضل المعادلة (2-10) بالنسبة للزمن، أي أن:

$$A(t) = dN(t) / dt$$

$$= \lambda N_0 \, e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \qquad (2\text{-}11)$$

وتعرف $A_0 = \lambda N_0$ بالشدة الإشعاعية عند اللحظة $t = 0$ ، لذا فإن:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}12)$$

2-6-3 عمر النصف ومتوسط العمر The half-life and mean-life

عمر النصف (أو العمر النصفي) للنظير المشع المعين هوعبارة عن الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها الشده الإشعاعية لعينة من هذا النظير إلى النصف. وبمعنى آخر فإن عمر النصف هو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد نوى العينة. ويرمز للعمر النصفي، عموما،

بالرمز $t_{1/2}$. وباقتفاء هذا التعريف فإنه بوضع $t = t_{1/2}$ ، $N(t) = N_o/2$ في العلاقة (2–10) يتبين أن:

$$N_0 / 2 = N_0 e^{- \lambda t1/2}$$

ومنها يتبين أن:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$= 0.693 / \lambda \qquad (2\text{-}13)$$

وحيث إن وحدة الزمن هي الثانية فإن وحدة قياس ثابت التفكك λ هي 1/ ثانية (أي ثانية$^{-1}$).

أما متوسط العمر لعينة مشعة والذي يرمز له عادة بالرمز τ (تاو) فهو عبارة عن مجموع أعمار جميع النوى العينة مقسوما على عددها ويسهل تحديده باستخدام العلاقة(2–10) كالآتي:

$$\tau = (1 / N_0 \int_0^{\infty} dN(t).t = 1/\lambda = t_{1/2} / 0.693 \qquad (2\text{-}14)$$

وهكذا نجد أن كلا من λ ، $t_{1/2}$ ، τ مرتبطة ببعضها بعلاقة بسيطة، ومعرفة إحداها يعين باقيها.

2–6–4 تعيين ثابت التفكك λ وعمر النصف $t_{1/2}$ عمليا

يمكن تحديد ثابت التفكك λ للعديد من النظائر المشعة باستخدام القانون (2–12) والذي يمكن كتابته في الشكل التالي

$$\ln \{A(t) / A_0\} = - \lambda t$$

حيث يمثل الرمز (ln) لوغاريتم الأساس الطبيعي (e = 2.71). وعند استخدام لوغاريتم الأساس العشري تأخذ العلاقة الأخيرة الشكل التالي:

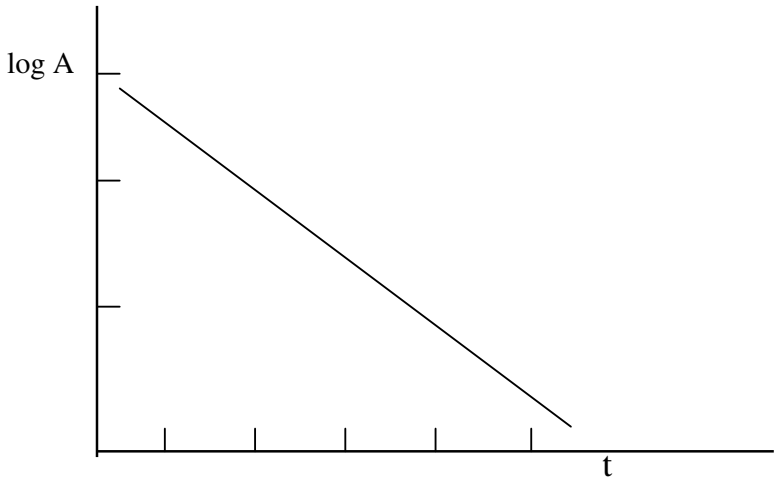
$$\log \{A(t) / A_0\} = - 0.4343 \lambda t \qquad (2\text{-}15)$$

لأن لوغاريتم عدد ما للأساس العشري = 0.4343 لوغاريتم العدد نفسه للأساس الطبيعي، أي أن:

$$\log A(t) = \log A_0 - 0.4343\ \lambda\ t \qquad (2\text{-}16)$$

وهكذا، فإنه عند قياس الشدة الإشعاعية للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين $\log A(t)$ والزمن t ، فإننا نحصل على خط مستقيم كالمبين في شكل (2–6) يبلغ ميله $S = -0.4343\ \lambda$. وبمقارنة الميل المحدد تجريبيا مع هذه القيمة الأخيرة يمكن تحديد قيمة ثابت التفكك λ. وبمعرفة ثابت التفكك يسهل إيجاد قيمة عمر النصف $t_{1/2}$ أو متوسط العمر τ لهذه العينة باستخدام العلاقات (2–13) و(2–14). ولقياس ثابت التفكك λ لعينة ما توضع هذه العينة على مسافة مناسبة من عداد الإشعاعات (الجهاز المستخدم لتسجيل عدد الإشعاعات) ويتم قياس معدل العد R (counting rate) خلال فترات زمنية متساوية. ويجب ملاحظة أن معدل العد R (وهو عبارة عن عدد الجسيمات المسجلة في وحدة الزمن) يتناسب مع الشدة الإشعاعية للعينة طالما أن وضع العينة بالنسبة للعداد لم يتغير طوال فترة إجراء التجربة أي أن:

$$R(t) / R_0 = A(t) / A_0$$



شكل (2–6)

العلاقة بين لوغاريتم الشدة الإشعاعية log A والزمن t

ولسهولة تحديد λ يستخدم ورق رسم بياني نصف لوغاريتمي حتى يستغنى عن استخراج قيمة اللوغاريتم في كل مرة. ولتحديد الميل تقسم عدد الدورات اللوغاريتمية على الزمن المقابل. ويمكن كذلك تحديد λ باستخدام العلاقة (2−16) مباشرة، حيث إن

$$\lambda = \{ \log A_0 - \log A(t) \} / 0.4343\, t$$

وفي هذه الحالة تختار نقطتان متباعدتان على المستقيم لتمثلا A_0 ، $A(t)$ ويكون t هو الفارق الزمني المقابل بين النقطتين المختارتين.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد عمر النصف مباشرة، وذلك من العلاقة (2−12). فعند قياس معدل العد $R(t)$ كدالة ورسم العلاقة بين $R(t)$ حيث $[R(t) \alpha A(t)]$ والزمن t نحصل على منحنى كالمبين في شكل (2−7)، ومنه يمكن تحديد عمر النصف $t_{1/2}$ مباشرة، حيث إنه عبارة عن الزمن الذي تنخفض خلاله شدة العينة إلى النصف. ويلاحظ أنه خلال فترتي عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^2 =$ (4/1) الشدة الأصلية، وخلال 7 فترات عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^7 =$ (128/1)من الشدة الأصلية وخلال عشر فترات تصبح الشدة $(2/1)^{10} =$ (1024/1) من الشدة الأصلية، أي أقل من 0.1 % من شدتها الأصلية . وهكذا فإنه بمرور الوقت تقل شدة العينة وتصبح قيمة مهملة بالنسبة للشدة الأصلية ولكنها لاتصل إلى الصفر.

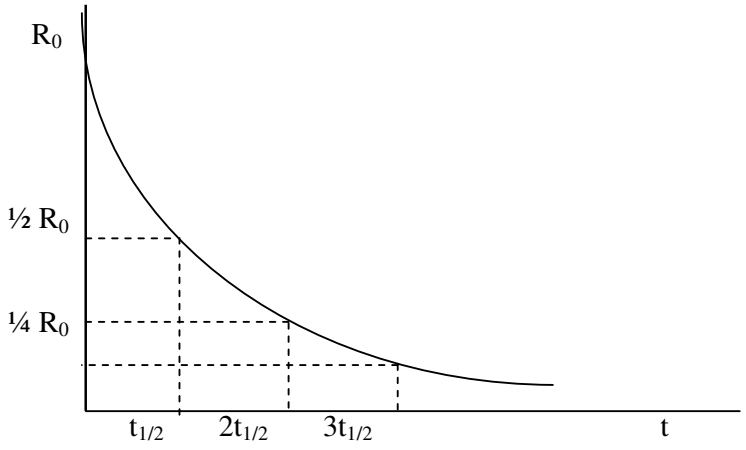
وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد ثابت التفكك λ أو عمر النصف $t_{1/2}$ بهذه الطريقة بالنسبة للنظائر التي يتراوح عمرها النصفي بين عدة ثواني وعدة سنوات. أما بالنسبة للنظائر التي يبلغ عمرها النصفي قيما عالية(كاليورانيوم 238 مثلا والذي يبلغ عمره النصفي 4.468×10^9 سنة) فإنه لا يمكن تحديد إعمارها النصفية أو ثابت التفكك لها بهذه الطريقة حيث أن الانخفاض في الشدة الإشعاعية لها لا يكون محسوسا خلال زمن التجربة حى ولو استمر هذا الزمن عشرات السنين. لذا، فإنه لتحديد ثابت التفكك للنظائر ذات العمر النصفي

الطويل فإنه يجب معرفة عدد النويات النشطة الموجودة في العينة في لحظة معين. ولما كان:

$$| dN / dt | = \lambda N$$

$$= A = R / C$$

حيث C عبارة عن ثابت يحدد نسبة عدد الجسيمات التي يسجلها العداد إلى عدد جميع الجسيمات الصادرة من العينة، R هو معدل العد فإنه بمعرفة معدل العد R والثابت C وعدد النوى النشطة في العينة N يمكن تحديد ثابت التفكك λ وبالتالي حساب عمر النصف للنظير المعين.



شكل (2-7)
العلاقة بين معدل العد R(t) والزمن t

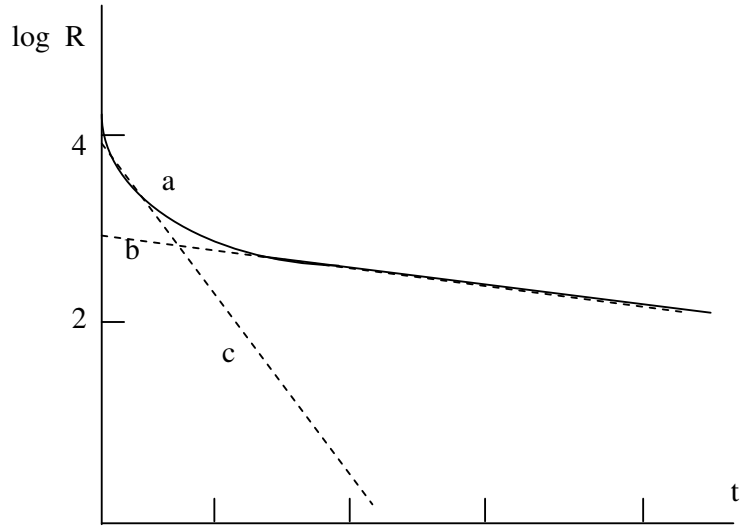
أما بالنسبة للنظائر ذات العمر النصفي الصغير فتستخدم طرق أخرى لتحديد أعمارهم النصفية.

2-6-5 تحديد العمر النصفي للنظائر المختلطة

يحدث أحيانا أن تكون العينة غير نقية وتحتوي على خليط من بعض النظائر المشعة المختلطة. فإذا كان الخليط مكونا من عدد محدود من النظائر المشعة (اثنين أو ثلاثة على الأكثر) واختلفت الأعمار

النصفية لهذه النظائر اختلافا ملموسا، فإنه يمكن تحديد العمر النصـــفي لكل نظير في المخلوط حتىعندما تكون الجسيمات الصادرة من النظائر المختلفة من النوع نفسه.

ولإجراء ذلك، يجب قياس معدل العد R(t) للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين log R والزمن t . ولغرض الإيضاح نفرض أن العينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط، وأن المنحنى المستمر a في الشـــكل (2–8) يحدد العلاقة بين log R ، t .



شكل(2–8)
العلاقة بين لوغاريتم معدل العد log R والزمن t
لعينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط

ويلاحظ أن الجزء الأيمن من المنحنى في الشكل (2–8) يمثـــل خطا مستقيما وهو بمثابة خط التفكك بالنسبة للنظير ذي العمر النصـــفي الأكبر، حيث إن النظير الآخر أسرع تفككا لصغر عمره النصفي. وعند مد الجزء المستقيم من المنحنى a إلى اليسار نحصل علـــى المســـتقيم b الذي يمثل التفكك بالنسبة للنظير الأطول عمرا. وبطرح المستقيم b مـــن

المنحنى a نحصل على مستقيم آخر هو c الذي يعتبر بمثابة مستقيم التفكك للنظير الأقصر عمرا. وبتحديد الميل لكل مستقيم من هذين المستقيمين يمكن تحديد ثابت التفكك λ_1 ، λ_2 لكل نظير على حدة.

2-6-6 التفكك الإشعاعي المتتابع

The successive radioactive decay

عند تفكك النواة الأم إلى نواة وليدة فإنه قد تكون النواة الوليدة نشطة إشعاعيا. عندئذ تتفكك النواة الوليدة إلى ان نواة تعرف باسم الحفيدة (grand-daghter). وهكذا، تستمر العملية إلى تصل في النهاية إلى نواة مستقرة. وتعرف هذه العملية بالتفكك الإشعاعي المتتابع .

فعلى سبيل المثال تتفكك نواة الراديوم 226(عمرها النصفي 1.6×10^3 سنة) إلى الرادون 222. وتتفكك هذه الأخيرة (عمرها النصفي 3.82 يوم) إلى نواة البولونيوم 218، التي تعتبر هي الأخرى مشعة (عمرها النصفي 3.05 دقيقة). وهكذا تستمر العملية إلى أن تصل في النهاية إلى نواة الرصاص 206 المستقرة.

والغرض من دراسة التفكك المتتابع هو معرفة عدد الذرات (النوى) في كل عضو من أعضاء هذه السلسلة.

فإذارمزنا لعدد ذرات النويدة الأم عند الزمن t بالرمز N_1 وثابت التفكك لها بالرمز λ_1 ، وعدد ذرات النويدة الوليدة N_2 التي يعتبر بدورها نشطة وثابت التفكك لها هو λ_2 ، وعدد ذرات النويدة الحفيدة N_3 واعتبارها مستقرة، وإذا فرضنا أنه عند اللحظة $t = 0$ كان عدد ذرات كل جيل هو:

$$N_1 = N_{10} , \qquad N_2 = 0 , \qquad N_3 = 0$$

أي أنه عند تحضير العينة كانت كلها من ذرات النويدة الأم، وباستخدام العلاقة (2-11)، والأخذ في الحسبان أن معدل تفكك النويدة الأم يساوي تماما معدل تكوين النويدة الوليدة، وأن معدل تفكك النويدة

الوليدة مساو لمعدل تكوين النويدة الحفيدة، فإنه يمكن التعبير عن العملية كلها بالمعادلات الثلاث التالية:

$$d N_1 / d t = - \lambda_1 N_1 \qquad (2\text{-}17)$$

$$d N_2 / d t = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}18)$$

$$d N_3 / d t = \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}19)$$

وتحدد العلاقة (2–17) معدل التفكك بالنسبة للنويدة الأم وذلك طبقا للقانون الأساسي للتفكك الإشعاعي. وأما العلاقة (2–18) فتعني أن النويدة الوليدة تتكون بمعدل $N_1 \lambda_1$. في حين أن العلاقة (2–19) تحدد معدل تكوين الذرات الحفيدة المستقرة N_3.

وبحل مجموعة المعادلات (2–17)، (2–18)، (2–19) فإنه يمكن تحديد عدد ذرات كل نوع من الأعضاء الثلاثة للسلسلة كدالة من الزمن t، وذلك كالآتي:

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) \qquad (2\text{-}20)$$

$$N_3 = N_{10} [1 + \{\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\}] e^{-\lambda 2 t} - \{\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}21)$$

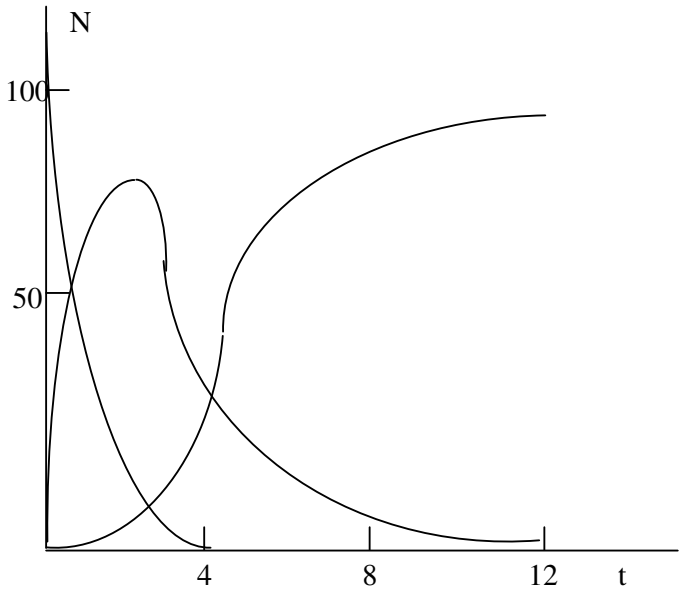
وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_{20} = N_{30} = 0$ عند لحظةالصفر. أما إذا اختلف كل من N_{20} ، N_{30} عن الصفر فيصبح عدد الذرات الوليدة والحفيدة كدالة من الزمن هو:

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) + N_{20} e^{-\lambda 2 t} \qquad (2\text{-}22)$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda 2 t}) + N_{10} [1 + \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} e^{-\lambda 2 t} - \{ \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}23)$$

ويوضح شكل (2–9) كيفية تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 كدالة من الزمن للتفكك المتتابع لنظير الروثينيوم 105، حيث يتفكك إلى الروديوم 105، وهذا الأخير يتفكك بدوره إلى البلاديوم 105 المستقر.

$$^{105}_{44}Ru \xrightarrow[t_{1/2} = 4.5\ h]{\beta^-} {}^{105}_{45}Rh \xrightarrow[t_{1/2} = 35\ h]{\beta^-} {}^{105}_{46}Pd$$



شكل (2–9)

تغير كل من عدد الذرات N_1 ، N_2 ، N_3 مع الزمن t
لنظير الروثينيوم 105

ويعبر المحور الرأسي عن عدد النوى الأم والوليدة والحفيدة عندما يكون عدد النوى الأم $N_{10}=100$، $N_{20} = N_{30} = 0$ ، في حين يعبر المحور الأفقي عن الزمن بالساعة. ويلاحظ أن N_1 يتناقص أسيا طبقا

لقانون التفكك الإشعاعي. أما N_2 فيكون صفرا عند $t = 0$ ثم يزداد طبقا للعلاقة (2-20) إلى أن يصل إلى أقصى قيمة عند زمن يساوي تقريبا ثلاثة أضعاف العمر النصفي ثم ينخفض من جديد.

أما بالنسبة للنوى الحفيدة N_3 فتكون أولا مساوية للصفر ثم تزداد ببطء كبير ولا تقترب من نهايتها (أي 100%) إلا بعد انقضاء زمن طويل (حوالي 5 أضعاف العمر النصفي للنظير الوليد).

2-6-7 التوازن الإشعاعي Radioactive equilibrium

عموما، فإن التوازن بالنسبة لأي كمية فيزيائية يعني أن هذه الكمية لا تتغير بالنسبة للزمن.

فإذا طبقنا هذا التعريف على جميع أعضاء سلسلة التفكك المتتابع فإن هذا يعني عدم تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 بالنسبة للزمن، أي أن:

$$d N_1 / dt = d N_2 / d t = dN_3 / d t \qquad (2\text{-}24)$$

وبذلك فإن شروط التوازن للتفكك المتتابع هي:

$$d N_1 / d t = - \lambda_1 N_1 = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

$$d N_2 / d t = 0 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

أي أن

$$\lambda_1 N_1 = \lambda \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}26)$$

وعموما، لا يمكن أن يحدث التوازن بمعناه الحرفي لأن هذا يعني بالنسبة للنواة الأم المشعة أن $\lambda \lambda_1 = 0$ (حيث N_1 لا تساوي صفرا). وهذا يعني أن النواة غير نشطة إشعاعيا وهو ما يتعارض مع النشاط الإشعاعي للنواة.

التوازن الأبدي The secular equilibrium

يمكن أن تتحقق حالات هي أقرب ما يمكن إلى التوازن. وتحدث هذه الحالات عندما تكون λ_1 صغيرة جدا وتقترب من الصفر (أي أن

العمر النصفي للنظير الأم كبيرجدا) في حين أن $\lambda_2 > \lambda_1$. عندئذ يسمى هذا النوع من التوازن بالتوازن الأبدي. وعندما يتحقق هذا النوع من التوازن، فإنه بالتعويض عن λ_1 بقيم صغيرة في العلاقة (2–20)، تتخذ هذه العلاقة الشكل التالي:

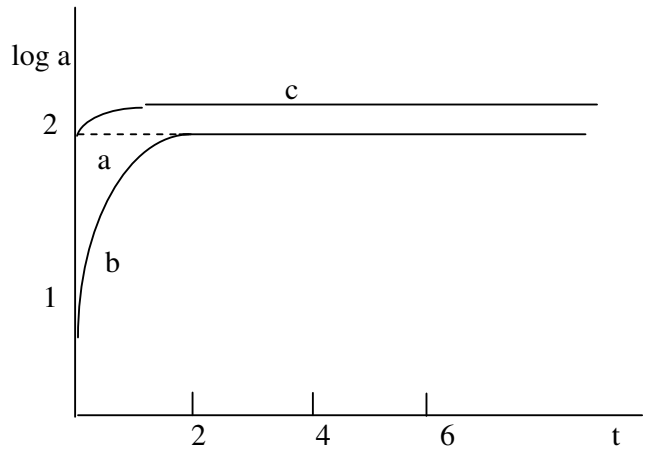
$$N_2 \cong (\lambda_1 / \lambda_2)\, N_{10}\, (1 - e^{-\lambda 2\, t})$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}\, (1 - e^{-\lambda 2\, t}) \qquad (2\text{-}27)$$

وتبين العلاقة(2–27) أنه بزيادة الزمن t يقترب الحد $e^{-\lambda 2t}$ من الصفر، وبالتالي نجد أن:

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} \qquad (2\text{-}28)$$

أي أنه يتحقق التوازن الأبدي حيث تصبح الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة مساوية تماما للشدة الإشعاعية للنوى الأم. ويعكس شكل (2–10) صورة التوازن الأبدي حيث يبين الخط a الشدة الإشعاعية للنوى الأم وهي ثابتة وتساوي $\lambda_1 N_{10}$ (حيث إن العمر النصفي كبير جدا). أما الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة (المنحنى b) فهي تزداد بمرور الوقت إلى أن تصل لنفس القيمة الثابتة وهي $\lambda_1 N_1$. ويبين المنحنى c الشدة الإشعاعية الكلية لكلا النظيرين المتتابعين.



شكل (2–10): التوازن الأبدي

ويمكن استخدام التوازن الأبدي لقياس ثابت التفكك λ_1 للنظائر ذات العمر النصفي الكبير وذلك باستخدام العلاقة (2–28). ولهذا الغرض، يجب معرفة ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد ذي العمر النصفي الصغير، وعدد ذرات النظير الأم ونسبة وجود النوى (الذرات) الأم مع النوى الوليدة بعد حدوث التوازن وبذلك يسهل تحديد قيمة λ.

مثال:

ملح من أملاح اليورانيوم 238 وجد أنه يحتوي على نسبة ضئيلة جدا من الراديوم 226 وهذا الراديوم يتكون نتيجة للتفكك المتتابع لليورانيوم 238. فإذا كانت هذه النسبة هي عبارة عن ذرة واحد لكل 2.8×10^6 ذرة يورانيوم، وإذا علمت أن العمر النصفي للراديوم هو 1620 سنة فما هو العمر النصفي لليورانيوم.

الحل:

من قانون الاتزان الأبدي:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

أي أن:

$$N_1 / N_2 = \lambda_2 / \lambda_1 = t_1 / t_2$$

حيث ، يرمزان للعمر النصفي لليورانيوم والراديوم بالترتيب، وبالتعويض في طرفي العلاقة الأخيرة فإن:

$$2.8 \times 10^6 \times 1620 = 1 \times t_1$$

أي أن:

$$t_1 = 4.54 \times 10^9 \text{ years}$$

التوازن الانتقالي The transient equilibrium

يوجد نوع آخر من التوازن يعرف باسم التوازن الانتقالي (transient equilibrium). ويحدث هذا النوع من التوازن عندما يكون ثابت التفكك λ_1 للنظير الأم أصغر من ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد (أي أن $\lambda_2 > \lambda_1$) ولكن λ_1 ليست قريبة من الصفر (أي أن العمر النصفي للنظير الأم ليس كبيرا). في هذه الحالة لا يمكن اعتبار أن $\lambda_1 = 0$. ومع ذلك فإن الحد الأسي $e^{-\lambda_2 t}$ يقترب من الصفر أسرع من الحد $e^{-\lambda_1 t}$. لذلك، فإنه بعد مرور زمن كاف يحدث التوازن الانتقالي وتتخذ العلاقة (2–20) الشكل التالي:

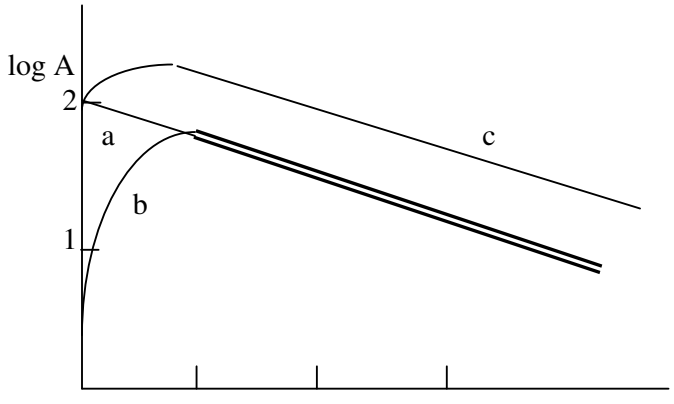
$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$= \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_1 \qquad (2\text{-}29)$$

وهذا يعني أن النوى الوليدة تتفكك بنفس معدل تفكك النوى الأم. وبذلك، تكون النسبة بين الشدة الإشعاعية A لكل من النوى الأم والنوى الوليدة هي:

$$A_1 / A_2 = \lambda_1 N_1 / \lambda_2 N_2 = (\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda_2 \qquad (2\text{-}30)$$

وتبين هذه العلاقة أن الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة تصبح بعد فترة زمنية معينة أكبر من الشدة الإشعاعية للنوى الأم. وهذا ما يوضحه شكل (2–11) الذي يبين الشدة الإشعاعية لكل من النوى الأم والنوى الوليدة كدالة في الزمن t إذا كان عدد النوى الوليدة عند $t = 0$ مساويا للصفر.



2 4 6 t

شكل (2–11): التوازن الانتقالي

2–7 السلاسل الإشعاعية الطبيعية

The natural radioactive series

تتميز نوى جميع النظائر ذات العدد الذري الأكبر من 82 بأنها جميعا غير مستقرة إشعاعيا، وذلك بسبب زيادة عدد البروتونات في النواة مما يجعل قوى التنافر الكهروستاتيكية كبيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى تفكك بعض تلك النظائر من خلال تفكك ألفا وإصدار جسيمات ألفا. ونتيجة لإصدار هذه الجسيمات تزداد نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النواة مما يؤدي إلى استيفاء شروط تفكك بيتا في بعض هذه النوى الوليدة وحدوث هذا التفكك مع إصدار الإلكترونات (جسيمات بيتا). وتوجد في الطبيعة ثلاث مجموعات تعرف بسلاسل الإشعاع الطبيعية وهي سلسلة الثوريوم ^{232}Th ، وسلسلة اليورانيوم – راديوم ، وسلسلة الأكتينيوم. وكانت هناك مجموعة رابعة هي سلسلة النبتونيوم، وهي لا توجد في الطبيعة الآن نظرا لأن العمر النصفي لأطول عناصرها عمرا هو 2.2×10^{6} سنة ، وهو أقل بكثير من عمر الأرض، الذي يقدر بحوالي $10x3^{9}$ سنة. ويبين جدول (2–1) أهم خصائص هذه السلاسل، والمعروفة أحيانا باسم سلاسل التفكك للعناصر الثقيلة .

جدول(2–1): السلاسل الإشعاعية الطبيعية

اسم السلسة	النواة النهائية المستقرة للمجموعة	النواة الأطول عمرا للسلسلة وعمرها النصفي بالسنوات
الثوريوم	الرصاص–208	الثوريوم–232، 1.39×10^{10}
اليورانيوم – راديوم	الرصاص–206	اليورانيوم–238، 1.47×10^{9}
الأكتينيوم	الرصاص–207	اليورانيوم–235، 8.12×10^{8}
النبتونيوم		

	بسموت–209	النيتونيوم–237، 2.2×10^{6}

وبالإضافة للسلاسل الإشعاعية الطبيعية توجد في الطبيعة بعض النظائر المشعة الأخرى مثل البوتاسيوم $^{40}_{19}K$ والساماريوم $^{147}_{62}Sm$ وغيرها. وتتميز هذه النظائر بأنها جميعا نشطة بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا(إلكترونات)، وأعمارها كبيرة جدا (أكثر من 10^{9} سنة).

2-8 النشاط الإشعاعي المستحث The induced radioactivity

بالإضافة إلى النظائر المشعة الطبيعية تمكن العلماء من إنتاج ما يزيد على ألف وثلاثمائة نظير مشع اصطناعي. وتنتج هذه النظائر الأخيرة عن طريق قذف النظائر المستقرة بأنواع مختلفة من الجسيمات النووية مثل جسيمات ألفا والبروتونات والنيوترونات وإشعاعات جاما. وتستخدم لهذا الغرض المفاعلات النووية كمصدر للنيوترونات أو معجلات الأيونات كمصدر للجسيمات المشحونة مثل جسيمات ألفا أو البروتونات أو حتى الأيونات الثقيلة، وكذلك كمصدر لإشعاعات جاما.

فمثلا لإنتاج الكوبلت 60 وهو نظير نشط له استخدامات عديدة في مجالات مختلفة تحضر عينة من الكوبلت 59 المستقرة، ويتم تشعيع هذه العينة بالنيوترونات داخل مفاعل نووي. وعند قذف نواة الكوبلت 59 المستقر بالنيوترون تتكون نواة الكوبلت 60 ،ويصدر هذا التفاعل في نفس لحظة التفاعل فوتون جاما وفقا للتفاعل.

$$^{59}_{27}Co + n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma\gamma$$

ويعرف هذا التفاعل بتفاعل الأسر النيوتروني الإشعاعي (neutron radioactive capture)، حيث يتم أسر النيوترون وتتكون بذلك نواة نظير جديد مع صدور فوتون جاما عن هذا الأسر في الحال. والكوبلت 60 المتكون نظير مشع، وعمره النصفي 5.27 سنة، ويتفكك إلى النيكل 60 مصدرا جسيم بيتا السالب، أي:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + \beta^{-} + \nu'$$

ويمكن في الوقت الحالي، إنتاج المئات من النظائر المشعة الاصطناعية بهذا الأسلوب. كما يستخدم نفس الأسلوب للحصول على عناصر جديدة أثقل من اليورانيوم، وهي المعروفة باسم عناصر ما وراء اليورانيوم (Trans- uranium elements). وهذه العناصر غير موجودة في الطبيعة نظرا لأن عمرها النصفي صغير.

فمثلا عند وجود نظير اليورانيوم 238 داخل المفاعل النووي يمكن أن تأسر نواة اليورانيوم نيوترونا، فيتكون بذلك اليورانيوم 239 وهو نظير مشع يتفكك مع إصدار جسيم بيتا مكونا عنصرا جديدا هو النبتونيوم 239، وذلك كالآتي:

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U + \gamma$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow {}^{239}_{93}Np + \beta^{-} + \nu'$$

والنبتونيوم بدوره نظير مشع ويتفكك مصدرا جسيم بيتا ومكونا بذلك عنصرا جديدا هو البلوتونيوم 239

$$^{239}_{93}Np \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu + \beta^{-} + \nu'$$

لذا ينتج نظير البلوتونيوم داخل المفاعلات بكميات كبيرة ويستخدم هذا النظير في إنتاج الطاقة وفي الأسلحة النووية. وعموما، فإنه يتم إنتاج العديد من العناصر الثقيلة كالأميريشيوم $_{95}Am$ (نسبة إلى أمريكا) والكوريوم $_{96}Cm$ (نسبة إلى السيدة ماري كوري) . والبيركيليوم $_{97}Bk$ (نسبة إلى مختبر بيركلي) والكالفورنيوم $_{98}Cf$ والأينشتينيوم $_{99}Es$ والفيرميوم $_{100}Fm$ (نسبة للعالم فيرمي) وغيرها بهذا الأسلوب نفسه.

وتجدر الإشارة إلى أن النظائر المصنعة باستخدام التشعيع النيوتروني تتفكك مصدرة الإلكترونات وذلك لزيادة نسبة النيوترونات على البروتونات.

وبالإضافة لاستخدام التشعيع النيوتروني في إنتاج النظائر المشعة فإنه يمكن إنتاج العديد من النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة كالبروتونات وجسيمات ألفا والأيونات الثقيلة. ولهذا الغرض تعجل هذه

الجسيمات المشحونة بواسطة المعجلات النووية حتى طاقات مناسبة ثم تقذف بها النظائر المستقرة فتتكون بذلك النظائر المشعة . وتبين المعادلات التالية أمثلة لإنتاج بعض النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة.

$$^{31}_{15}P + {}^{2}_{1}d \longrightarrow {}^{32}_{15}P + p$$

أي أنه عند قذف الفسفور 31 المستقر بالديوترون (نظير الهيدروجين) يتكون الفسفور 32 المشع وينطلق بروتون. كذلك، يمكن إنتاج الفلور 17 المشع كالتالي:

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{17}_{9}F + {}^{1}_{0}n$$

ويعني هذا التفاعل الأخير أنه عند قذف النيتروجين 14 المستقر بجسيمات ألفا α يتكون الفلور 17 المشع وينطلق نيوترون. كذلك، فإنه عند قذف اليورانيوم 238 بأيون ثقيل مثل أيون الأكسجين يتكون نظير الفرميوم 250 وتخرج أربعة نيوترونات.

$$^{238}_{92}U + {}^{16}_{8}O \longrightarrow {}^{250}_{100}Fm + 4\,n$$

وعموما تستخدم تفاعلات الأيونات الثقيلة بكثرة للحصول على عناصر ما وراء اليورانيوم.

وتجدر الإشارة إلى أن إنتاج النظائر المشعة بقذفها بالنيوترونات أو الجسيمات المشحونة يتطلب وجود سيال (تيار) عال من هذه الجسيمات نظرا لأن احتمال حدوث التفاعل المعين يكون عادة صغير جدا. لذلك، يجب أن تكون كثافة التدفق النيوتروني في حدود 10^{12} حتى 10^{16} نيوترون لكل سم^2 في الثانية، تبعا لاحتمال حدوث الأسر النيوتروني في النظير المعين. وتحقق جميع المفاعلات النووية هذا المطلب. أما المعجلات فيكون عادة سيالها أقل. ويعرف احتمال حدوث التفاعل المعين بالمقطع العرضي (cross-section) وهو عبارة عن احتمال حدوث التفاعل لو قذف جسيم واحد على نواة واحدة موجودة في مساحة

مقدارها ا سم^2. ووحدة المقطع العرضي هي البارن (barn) ، وهي وحدة صغيرة تعادل مساحة مقدارها 10^{-24} سم^2 ، أي أن:

(1 بارن = 10^{-24} سم^2)

2-8-1 حساب عدد النوى المشعة المستحثة بالتشعيع

عند إنتاج النظائر المشعة بالتشعيع في مفاعل ما فإنه يجب معرفة الشدة الإشعاعية للعينة بعد التشعيع. فبعد بدء التشعيع يتراكم عدد النوى المستحثة وتبدأ بدورها في التفكك. ويكون هناك معدلان، الأول عبارة عن معدل تكوين النوى المشعة والآخر هو معدا تفككها.

وطبقا للمعادلة(2-18) فإن تغير النوى المستحثة هو:

$$dN_2 / d t = \lambda\lambda_1 N_1 - \lambda\lambda_2 N_2$$

حيث $\lambda\lambda_1 N_1$ هو عبارة عن معدل التكوين عن طريق التشعيع، $\lambda\lambda_2 N_2$ هو معدل التفكك. وحيث إن تكوين الذرات المشعة لم ينتج عن تفكك الذرة الأم ولكن ينتج عن تشعيع ذرات مستقرة فإنه يجب التعبير عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بأسلوب آخر. ومن المعروف أن عدد الذرات النشطة N التي تتكون في الثانية بالتشعيع سوف تتناسب تناسبا طرديا مع عدد الذرات المستقرة في العينة N_{10} ومع كثافة النيترونات n (عدد النيوترونات في وحدة الحجم) ومقدار المقطع العرضي σ للأسر النيوتروني وكذلك مع سرعة النيوتروناتvv ،أي أن:

$$\lambda_1 N_1 = N = n v v\sigma N_{10} \qquad (2\text{-}31)$$

وبالتعويض عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بقيمتها في العلاقة السابقة، نجد أن:

$$dN_2 / d t = n v \sigma N_{10} - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}32)$$

وبحل هذه المعادلة التفاضلية بالنسبة للعدد N_2 ، نجد أن:

$$N_2 = [n v \sigma N_{10} / \lambda] (1- e^{-\lambda\lambda 2t}) \qquad (2\text{-}33)$$

ويعرف الحد المحصور بين القوسين الدائريين باسم معامل نمو العينة. فإذا كان زمن التشعيع أصغر من العمر النصفي $t_{1/2}$ نجد أن:

$$(1- e^{- \lambda 2t}) \approx \lambda_2 t$$

وعندئذ تأخذ العلاقة (2−33) الشكل التالي:

$$N_2 = n v \sigma v N_{10} t$$

أما إذا استمر التشعيع لمدة طويلة (ثلاثة أضعاف العمر النصفي فأكثر) فإننا نجد أن:

$$(1- e^{- \lambda 2t}) = 1$$

عندئذ تأخذ العلاقة (2−33) الشكل التالي:

$$N_2 = n v \sigma N_{10} / \lambda_2 \qquad (2\text{-}35)$$

أي أن عدد النوى المشعة في العينة يصبح ثابتا ولا يزداد العدد مهما زاد زمن التشعيع ويقال إن العينة وصلت إلى حالة التشبع. وبمعنى آخر يكون قد تحقق التوازن الأبدي. لذا، فإنه لا جدوى بعد ذلك من استمرار التشعيع لأن عدد النوى المستحثة يكون مساويا تماما لعدد النوى المتفككة. ولزيادة الشدة الإشعاعية للعينة يجب زيادة عدد الذرات المستقرة N_{10} قبل التشعيع أو زيادة كثافة النيوترونات n (أي وضع العينة في مكان تكون كثافة النيوترونات فيه أعلى).

2−9 وحدات قياس النشاط الإشعاعي Units of radioactivity

كانت الوحدة الأساسية لقياس الشدة الإشعاعية للعينة هي الكوري Courie (Ci) وأجزاؤه وهي المللي كوري (mCi) والميكروكوري(μμ Ci) وقد ارتبط الكوري تاريخيا بأنه الشدة الإشعاعية (عدد التفككات في الثانية الواحدة) لجرام واحد من الراديوم 226. وبعد معايرة الشدة الإشعاعية لجرام الراديوم وجدت أنها مساوية 3.7×10^{10} تفكك في الثانية. بذلك أصبح تعريف الكوري وأجزائه هو:

كوري واحد 1Ci = 3.7×10^{10} تفكك في الثانية

مللي كوري 1mCi = 3.7 x 10^{7} تفكك في الثانية
ميكروكوري 1μμCi = 3.7 x 10^{4} تفكك في الثانية

وينتج عن التفكك الواحد، عادة، جسيم مشحون (بيتا أو ألفا) ويصاحب ذلك في معظم الحالات وليس في كلها إصدار إشعاع أو إشعاعات جاما.

والوحدة المعيارية الدولية الآن للشدة الإشعاعية هي البكرل (Becquerel) . والبكرل عبارة عن تفكك واحد في الثانية. وبمقارنة البيكريل بالكوري نجد أنه وحدة صغير جدا. لذا، تستخدم مضاعفات البكرل وهي الكيلوبكرل والميغابكرل والغيغابكرل والتيرابكرل وقيمها كالتالي:

بيكريل واحد 1Bq = 1 تفكك في الثانية
كيلوبيكريل 1 K Bq = 10^{3} تفكك في الثانية
ميغابيكريل 1 M Bq = 10^{6} تفكك في الثانية
غيغابيكريل 1 G Bq = 10^{9} تفكك في الثانية
تيرابيكريل 1 T Bq = 10^{12} تفكك في الثانية

وهناك وحدة ثالثة للنشاط الإشعاعي ولكنها نادرة الاستخدام وهي راذرفورد Rutherford (rd) وهي عبارة عن 10^{6} تفكك في الثانية وأجزاء الراذرفورد هي المللي والميكرو وغيرها.

2-10 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- باستخدام جداول الكتل الذرية مع إهمال طاقة الربط للإلكترونات المدارية حدد أسلوب تفكك النظائر التالية:

$^{225}_{88}Ra$, $^{228}_{88}Ra$, $^{230}_{89}Ac$, $^{234}_{92}U$, $^{234}_{90}Th$

2- باستخدام جداول الكتل الذرية حدد ما إذا كانت النظائر التالية نشطة إشعاعيا أو مستقرة بالنسبة لإصدار جسيمات ββ ، وما نوع التفكك في الحالات النشطة؟

$^{111}_{47}Ag$, $^{65}_{29}Cu$, $^{56}_{27}Co$, $^{24}_{11}Na$

3- ما هي أنواع تفكك النظائر التالية؟

$^{210}_{84}Po$, $^{241}_{95}Am$, $^{214}_{83}Bi$, $^{226}_{88}Ra$

علما بأنها جميعا نشطة بالنسبة لتفكك ألفا.

4- ما هي نواتج تفكك النظائر التالية علما بأن أسلوب التفكك مبين قرين كل نظير؟

$^{137}_{55}Cs(\beta^-)$, $^{90}_{38}Sr(\beta^-)$, $^{40}_{19}K(\beta^+,\beta^-)$, $^{22}_{11}Na(\beta^+)$

5- إذا علمت أن الفلور21 يتفكك مع إصدار إلكترون مكونا النيون 21 وأن النيون الناتج يتكون في الحالة الأرضية، أو في الحالتين المثارتين بطاقتي إثارة 0.350 ، 1.75 ميغا إلكترون فولت. ما هي طاقات إشعاعات جاما الصادرة من النيون. وما ترددها؟

6- قارن أطياف جسيمات ألفا، وبيتا وإشعاعات جاما الصادرة عن نظائر مشعة.

7- في السلاسل الإشعاعية الطبيعية ما السبب في أن تفكك ألفا يكون متبوعا بتفكك بيتا سالب؟

8- احسب العمر النصفي لعينة مشعة من نتائج القياسات التالية:

الزمن (ساعة)	صفر	1	2	3	4	5	6	7	8
معدل العد	–	1640	1210	900	660	490	360	270	200

وما هو معدل العد بعد 15 ساعة من بدء القياسات؟.

9- لديك عينة من الكوبالت 60 عمرها النصفي 5.27 سنة.
احسب ثابت التفكك لها.
احسب الشدة الإشعاعية بالكوري والبيكريل إذا كان وزن العين عند التحضير 1 مللي جرام.
أوجد الشدة الإشعاعية لهذه العينة بعد عشر سنوات.

10 إذا كان العمر النصفي للبولونيوم 210 هو 140 يوما، ولديك عينة محضرة حديثا وزنها 10 مللي جرام، فما هي شدة العينة عند التحضير وبعد عامين؟

11- احسب كتلة عينة شدتها1 كوري من الكوبلت عند التحضير، إذا علمت أن العمر النصفي للكوبلت هو 5.27 سنة.

12- إذا علمت أن النيوديميوم 149يتفكك كالتالي:

$$^{149}_{60}Nd \xrightarrow[\text{ساعة } 1.8]{} {}^{149}_{61}Pm \xrightarrow[\text{ساعة } 47]{} 149_{62}Sm$$

وأن عدد ذرات النيوديميوم المشعة عند تحضير العينة هو 10^{8} ذرة، ولا توجد أي ذرات أخرى للعناصر الوليدة.
ارسم بعد إجراء الحسابات كيفية تغير عدد كل نوع من الذرات كدالة من الزمن.

13- في لحظة معينة كانت لديك عينة نقية مقدارها1جم من اليورانيوم 235 ، فإذا علمت أن معادلة تفكك اليورانيوم235 هي:

$$^{235}_{92}U \xrightarrow[\text{سنة } 10^{8} \times 7]{} {}^{231}_{90}Th \xrightarrow[\text{سنة } 25.5]{} {}^{231}_{91}Pa \longrightarrow {}^{227}_{89}Ac$$

احسب عدد ذرات الثوريوم231بعد يوم، وسنة، 10^{8} سنة.

14- وضعت عينة كتلتها 2جم من الكوبلت 59 داخل مفاعل كثافة النيوترونات فيه 10^{13} نيوترون/سم^3 لمدة 24 ساعة.
أوجد الشدة الإشعاعية لهذه العينة في نهاية التشعيع إذا علمت أن المقطع العرضي لأسر النيوترونات في الكوبلت 59 هو 3 بارن وأن طاقة النيوترونات المتوسطة1 إلكترون فولت.

15- إذا علمت أن طاقة الترابط للإلكترونات بوحدة ك.إ.ف في القشرات المختلفة لذرة النحاس هي كالمبينة في الجدول التالي. احسب طاقات خطوط الأشعة السينية المميزة للنحاس.

القشرة	K	L_2	L_3	M_2	M_3
طاقة الترابط	8.980	0.953	0.933	0.077	0.075

الفصل الثالث

تفاعل الإشعاعات المتبادل مع المادة
Interaction of radiation with matter

مقدمة – التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة الثقيلة والمادة – التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة – التفاعل المتبادل بين إشعاعات جاما والمادة – التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة – أسئلة ومسائل.

3-1 مقدمة

يتعرض هذا الفصل للتفاعل المتبادل بين الإشعاعات والمادة. والمقصود بكلمة الإشعاعات هنا هو جميع أنواع الإشعاعات كالجسيمات المشحونة الثقيلة (جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات)، والجسيمات المشحونة الخفيفة كالإلكترونات والبوزيترونات، وإشعاعات جاما والأشعة السينية، والنيوترونات. ولا يتعرض هذا الفصل للتفاعلات النووية التي قد تحدثها الإشعاعات في المادة ولكنه يقتصر على دراسة التأثير الجهري (الماكروسكوبي) المتبادل بين الإشعاعات والمادة مثل امتصاص الإشعاعات في المادة أو اختراقها لها. ونظرا لاختلاف هذه التأثير باختلاف نوع الإشعاعات واختلاف طاقاتها فسوف يدرس التأثير كل نوع على حدة.

3-2 التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة والمادة
Interaction of heavy charged particles with matter

3-2-1 انتقال الطاقة بين الجسيمات للمادة The energy transfer

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة، كجسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات وغيرها، على المادة تنتقل طاقة هذه

الجسيمات إلى المادة بالتدريج إلى أن تتوقف الجسيمات الساقطة. ويتم هذا الانتقال أساسا عن طريق التصادمات غير المرنة (inelastic collision) مع إلكترونات ذرات المادة التي تمر خلالها الجسيمات. وينتج عن هذه التصادمات بين الجسيمات المشحونة الساقطة والإلكترونات إثارة لهذه الذرات (أي انتقال أحد إلكترونات الذرة من مداره إلى مدار آخر ذي طاقة أعلى) أو تأينها (أي انفصال إلكترون عن ذرته تماما). وهكذا يحدث تأين ابتدائي لذرات المادة وهو ذلك التأين الناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها. ويمثل هذا التأين الابتدائي حوالي 30 % من إجمالي التأين الناتج عن توقف الجسيم المشحون في المادة. وأما النسبة الباقية وهي حوالي 70 % من إجمالي التأين فتعرف بالتأين الثانوي، وهو ناتج عن إلكترونات التأين الابتدائي التي تنطلق بسرعات عالية نسبيا، فتؤدي بدورها إلى تأين المادة . وتسمى الإلكترونات الثانوية باسم إلكترونات دلتا (δ- electrons) .

وهكذا، تفقد الجسيمات المشحونة الثقيلة طاقتها بالتدريج مع تغلغلها داخل المادة وتقل بالتالي سرعاتها إلى أن تصبح قريبة من سرعة إلكترونات المدار K لذرة الجسيم الساقط، فيحدث عندئذ تبادل بين الإلكترونات المدارية لذرات المادة وإلكترونات التأين الناتجة عن الجسيم الساقط. وقد يصل عدد هذه التبادلات إلى 10^3 مرة قبل أن يتحول الجسيم الساقط إلى ذرة متعادلة.

وهكذا، يتكون نتيجة لتأين الذرة الواحدة زوج إلكتروني– أيوني. ويمكن قياس العدد الكلي n للأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن كل من التأين الابتدائي والثانوي، وذلك باستخدام الطرق التجريبية المختلفة. وبمعرفة كل من طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E وعدد الأزواج n فإنه يمكن حساب القيمة المتوسطة $\bar{W}$ للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – أيوني واحد من العلاقة التالية:

$$\bar{W} = E / n \qquad (3\text{-}1)$$

ولقد وجد أن قيمة $\bar{W}$ اللازمة لتكوين زوج واحد تعتمد اعتمادا واضحا على نوع المادة ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة أو

على طبيعة هذه الجسيمات. كما وجد أن قيمة W تكون صغيرة جدا فهي تساوي 35 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية من الضغط ودرجة الحرارة. وهذا يعني أن الجسيمات الساقطة تتعرض لعدد كبير للغاية من التصادمات قبل أن تتوقف. وعند فقد هذه الكمية الصغيرة من الطاقة في كل تصادم فإن الجسيمات الساقطة لا تغير اتجاه مسارها، وهذا هو السبب في أن أثر (the track) الجسيمات المشحونة الثقيلة في المادة يكون عبارة عن خط مستقيم. كذلك، يلاحظ أن طول الأثر للجسيمات المشحونة الثقيلة يعتمد على طاقة هذه الجسيمات ونوعها ونوع المادة. وبالنسبة للنوع نفسه من الجسيمات والمادة تكون أطول آثار الجسيمات المشحونة الثقيلة واحدة تقريبا طالما كانت طاقاتها واحدة.

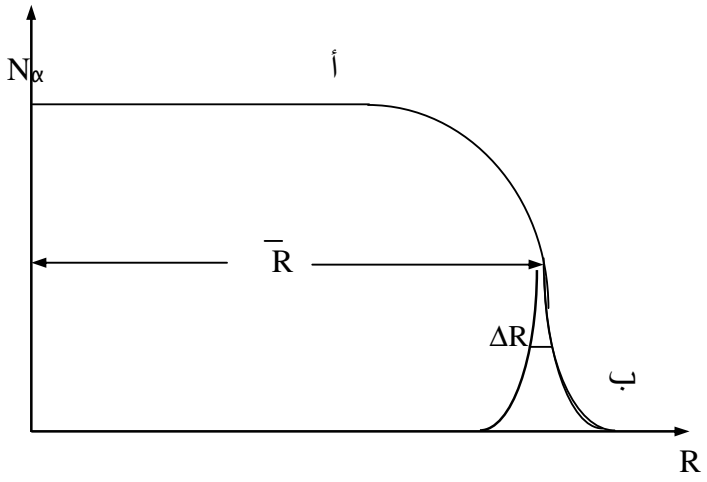
وتجدر الإشارة إلى أن الجسيمات المشحونة الساقطة تتفاعل مع نوى المادة التي تمر خلالها. إلا أن هذا التفاعل يعتبر مهملا كوسيلة من وسائل فقد الطاقة حيث أن احتمال التصادم مع النوى أقل بكثير جدا من احتمال التصادم مع الإلكترونات.

3-2-2 مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة

Range of heavy charged particles

مدى الجسيم المشحون في مادة ما هو عبارة عن طول المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم، في اتجاه سقوطه، في هذه المادة. ولما كان أثر الجسيم الثقيل عبارة عن خط مستقيم فإن مدى الجسيم الثقيل هو نفسه عبارة عن أثر هذا الجسيم في المادة. وقد ذكر في البند السابق أن طول الأثر للجسيمات المعينة يكون واحدا تقريبا طالما كانت طاقتها الابتدائية واحدة. ولكن يجب ملاحظة أن تصادم الجسيم الساقط مع الإلكترونات عملية إحصائية بحتة. فقد تختلف المسافة بين التصادمات، وبالتالي، يختلف طول الأثر اختلافا طفيفا، مما يؤدي إلى حدوث اختلاف طفيف في المدى للجسيمات من النوع نفسه وذوي الطاقة الواحدة. ويعرف هذا الاختلاف أو التراوح في مدى الجسيمات ذات الطاقة الواحدة بالتبعثر في المدى (straggling).

وعند قياس مدى جسيمات ألفا في الهواء (وذلك بقياس عدد جسيمات ألفا التي تسجل عند مسافات مختلفة من مصدر هذه الجسيمات، شريطة أن تكون جسيمات ألفا الخارجة من المصدر في شكل حزمة ضيقة ومتوازية)، تكون الصورة كالمبينة في شكل (3–1) بالمنحنى (أ). وبتفاضل هذا المنحنى ينتج منحنى جديد (ب) يعرف باسم المنحنى التفاضلي للتبعثر، وهو يوضح طبيعة التبعثر في المدى. ويسمى المقدار R المبين بالشكل بالمدى المتوسط (mearange). ويعتبر نصف العرض ΔR للمنحنى ب ، الذي يقاس ($1 / e = 1 / 2.71$) من أقصى ارتفاع لهذا المنحنى وسيطا مهما لقياس قيمة التبعثر. فكلما زاد ΔR كان التبعثر في المدى كبيرا والعكس صحيح.



شكل(3–1)

أ– مدى جسيمات α في الهواء

ب– المنحنى التفاضلي للتبعثر

ولقياس مدى الجسيمات الثقيلة في الغازات أو الأجسام الصلبة فإنه يفضل تثبيت كل من المصدر والكاشف على مسافة مناسبة في حيز مفرغ من الهواء الجوي ثم يتم إدخال الغاز المعين بضغوط مختلفة،

ويحسب عدد الجسيمات التي تسجل في الكاشف عند كل ضغط. ويـــزاد الضغط حتى يتوقف الكاشف عن تسجيل الجسيمات. وترسم العلاقة بين معدل العد وضغط الغاز فنحصل على منحنى مشابها للمنحنـــى (أ). ثـــم تحول الضغوط المختلفة عند مسافة مسافة ثابتة إلى مسافات مختلفة عند ضغط ثابت مساو للظروف الطبيعية، فنحصل على علاقة بين معدل العد N والمسافة R كالمبينة في شكل (3–1). والسبب في اتباع ذلك الأسلوب هو المحافظة على قيمة زاوية رؤية الكاشف للمصدر ثابتة. أما بالنســـبة للمواد الصلبة فيقاس المدى بعد تثبيت كل من المصدر والكاشف في حيز مفرغ ثم يوضع سُمك صغير من المادة أولا ويزداد السمك بالتدريج إلى أن يتوقف الكاشف تماما عن العد. ثم ترسم العلاقة بـــين معـــدل العـــد والسمك المقابل للمادة.

3–2–3 التأين النوعي وقدرة الإيقاف

The specific ionization and the stopping power

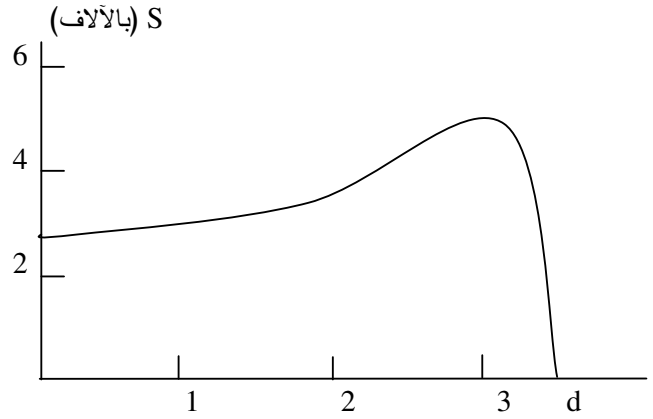
التأين النوعي S The specific ionization

يعرف التأين النوعي S على أنـــه عـــدد الأزواج الإلكترونيـــة – الأيونية المتكونة خلال ملليمتر واحد من الأثر في الهواء الجـــوي عنـــد درجة حرارة 15° مئوية وضغط مساو 760 مم زئبق. وتصل قيمـــة S بالنسبة لجسيمات ألفا عدة آلاف زوج لكل ملليمتر من الأثر، وذلك عندما تكون طاقة جسيمات ألفا في حدود عدة ميغا إلكترون فولت.

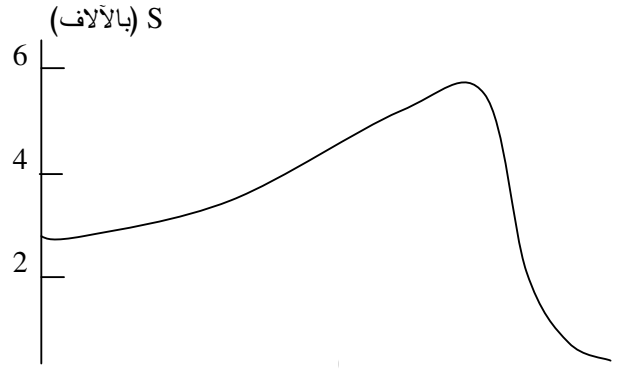
وعند رسم العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر هذا الجسيم نحصل على علاقة كالمبينة في شكل (3–2). ويبين هذا الشكل أن التأين النوعي يكون صغيرا عنـــدما يكون جسيم ألفا في بداية الأثر أي عندما تكون طاقته مازلـــت كبيـــرة. ويزداد التأين النوعي بالتدريج إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له عنـــدما يصبح جسيم ألفا في نهاية الأثر أي عندما تصبح طاقته صـــغيرة جـــدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن زمن تعرض إلكترونـــات ذرات المـــادة للمجال الكهربي للجسيم يصبح طويلا نسبيا عندما تنخفض سرعة هـــذا

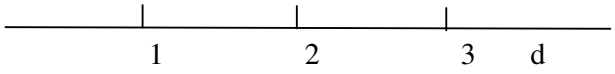
الجسيم، أي عندما تقل طاقته. وزيادة زمن التعرض يؤدي بالتالي إلى زيادة احتمال التأين.

وعند رسم العلاقة بين التأين النوعي S وبين المسافة من المصدر بالنسبة لحزمة متوازية من جسيمات ألفا نحصل على منحنى كالمبين في شكل (3–3). وهذا المنحنى يختلف اختلافا طفيفا عن سابقه عند نهاية الأثر. ويرجع السبب في هذا الاختلاف إلى التبعثر. ويعرف هذا المنحني الأخير بمنحنى براغ (Bragg curve) للتأين النوعي.



شكل (3–2) :العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر الجسيم





شكل (3−3): منحنى براغ للتأين النوعي

قدرة الإيقاف The stopping power (- dE/dx)

هي عبارة عن معدل فقد الجسيم المعين ذي الطاقة المعينة لطاقته داخل المادة. والإشارة السالبة تعني فقد الطاقة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة. وترتبط قدرة الإيقاف بالتأين النوعي S بالعلاقة التالية:

$$(- dE / dx) = \bar{W}. S \qquad (3\text{-}2)$$

حيث $\bar{W}$ هي القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني _ أيوني. ومن هذه العلاقة الأخيرة يمكن تعريف قدرة الإيقاف على أنها كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم في ملليمتر واحد من الأثر. ولما كانت S تعتمد على طاقة الجسيم ونوعه، $\bar{W}$ تعتمد على نوع المادة، فإن قدرة الإيقاف تعتمد على كل من نوع الجسيم وطاقته ونوع المادة.

ولقد تمكن هانز بيتي (H.Bethe) من اشتقاق العلاقة النظرية لقدرة الإيقاف المتوسطة لكل 1 سم من المادة، وهي:

$$(-dE /dx) = (4\pi e^4 z^2 /m_0 v^2)\, ZN\, [\ln (2m_0 v / I)_v - \ln(1-v^2/c^2) - v^2 /c^2] \qquad (3\text{-}3)$$

حيث z ، v هما شحنة وسرعة الجسيم الساقط، m_0 هي كتلة الإلكترون عند السكون، N هو عدد ذرات المادة لكل اسم^3 ، Z هو العدد الذري للمادة، I هو متوسط كمون (الجهد) التأين لذرات هذه المادة و c هي سرعة الضوء في الفراغ. فإذا كانت طاقة الجسيمات الثقيلة الساقطة صغيرة (أي حدود عدة عشرات من الميغا إلكترون فولت) تكون سرعتها صغيرة بالنسبة لسرعة الضوء وبالتالي يمكن اعتبار أن النسبة بين سرعة الجسيم وسرعة الضوء تساوي صفر($v / c = 0$) ، عندئذ تعطى قدرة الإيقاف المتوسطة بالعلاقة:

$$(- dE/dx) = (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2)\, N Z \ln (2m_0 v / I)$$

$$= (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2) N B \qquad (3\text{-}4)$$

حيث

$$B = Z \ln (2m_0 v / I)$$

وتجدر الإشارة إلى أن العلاقتين (3-3)، (3-4) لا تصلحان للاستخدام عند الطاقات الصغيرة جدا حيث يحدث تبادل الإلكترونات بين المادة والجسيم. كذلك، فإن قيمة I الواردة في العلاقتين يجب تحديدها تجريبيا.

وفي الأغراض العلمية يفضل اتخاذ قيمة فيزيائية أخرى تعرف باسم قدرة الإيقاف النسبية (Relative Stopping Power RSP) . وقدرة الإيقاف النسبية لمادة ما هي عبارة عن النسبة بين مدي الجسيمات المعينة في الهواء عند الظروف المعيارية ومدى نفس الجسيمات في المادة.

وباستخدام العلاقة (3-4) لكل من الهواء والمادة نجد أن

$$RSP = (- dE / dx)_{air} / (-dE/dx)_{abs} = N_{air} B_{air} / N_{abs} B_{abs} \quad (3\text{-}5)$$

حيث air تعود على الهواء، abs تعود على المادة الممتصة للطاقة.

وعندما تكون المادة في شكل مركب كيميائي لعدة عناصر فإنه يجب إيضاح أن طاقة الروابط الكيميائية بين العناصر المختلفة تعتبر مهملة ولا تشكل أي أثر على قدرة الإيقاف للمادة المكونة من عدة عناصر. لذا، فإنه عندما تكون المادة الممتصة في شكل مركب كيميائي تعتبر قدرة الإيقاف في المركب مساوية لمجموع قدرات الإيقاف في كل مادة على حدة مع الأخذ في الاعتبار نسب المواد في المركب، أي أن قدرة الإيقاف في المادة المركبة هي:

$$(- dE/dx)_{comp} = (N_1/N_0) (-dE/dx)_1 + (N_2/N_0)_2 (-dE/dx)_2 + \ldots\ldots \qquad (3\text{-}6)$$

حيث $(-dE/dx)_{comp}$ هي قدرة الإيقاف للمادة المركبة، $(-dE/dx)_1$، $(-dE/dx)_2$ ،... هي قدرات الإيقاف في المواد الأولى والثانية، و.... المكونة لهذا المركب، N_0 هو عدد ذرات المركب لكل ا سم^3 و N_1 , N_2 عدد ذرات المادة الأولى والثانية لكل سم^3.

وباستخدام العلاقة (3–4) يمكن إيجاد العلاقة بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبروتونات في المادة نفسها، حيث نجد أن:

$$\{ (-dE/dx)_{\alpha(4E)} / (-dE/dx)_{p(E)} \} = 4 \qquad (3\text{-}7)$$

وتعني هذه العلاقة أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا أكبر بمقدار أربعة أضعاف من قدرة الإيقاف للبروتونات التي طاقتها تساوي ¼ طاقة جسيمات ألفا، وذلك عند استخدام المادة نفسها. فمن المعروف أن مدى جسيمات ألفا في الهواء يساوي 3.5 سم إذا كانت طاقتها حوالي 5 ميغا إلكترون فولت. وبذلك، يكون مدى البروتون الذي تبلغ طاقته $5 \div 4 = 1.25$ ميغا إلكترون فولت، هو $3.5 \times 4 = 14.0$ سم عند الظروف نفسها من الضغط والحرارة. ويوضح هذا المثال أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا كبيرة (أي أن مداها قصير). وتقل هذه القدرة كلما صغرت كتلة الجسيم أو شحنته.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد المدى بدلالة قدرة الإيقاف، وذلك طبقا للعلاقة التالية:

$$R = \int_0^R dx = \int_0^E dE \,/(-dE \,/\, dx) \qquad (3\text{-}8)$$

وتعرف هذه المعادلة بالعلاقة بين المدى والطاقة (range - energy relation) ، وعند التعويض عن قدرة الإيقاف من العلاقة (3–4) فإنه يمكن إيجاد قيمة المدى. ولكن هذه القيمة تكون غير دقيقة حيث أن العلاقة (3–4) لا تصلح للاستخدام عن نهاية المدى.

3–3 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة

Interaction of electrons with matter

3-3-1 انتقال الطاقة من الإلكترون للمادة

عندما تكون طاقة الإلكترونات الساقطة (أقل من ½ ميغا إلكترون فولت) تفقد هذه الإلكترونات طاقاتها عن طريق إثارة الإلكترونات المدارية لذرات المادة أو تأيين هذه الذرات بنفس أسلوب انتقال الطاقة من الجسيم الثقيل إلى المادة. وتبلغ نسبة التأين الابتدائي في حالة الإلكترونات حوالي 20 % والباقي ناتج عن التأين الثانوي. ونظرا لأن كتلة الإلكترون صغيرة للغاية بالنسبة لكتلة الجسيم الثقيل تكون سرعة الإلكترونات كبيرة للغاية بالمقارنة بسرعة الجسيم الثقيل الذي يكون له نفس الطاقة. وهذا يعني أن زمن بقاء الإلكترون بالقرب من ذرة معينة من ذرات المادة يكون صغيرا للغاية، مما يؤدي إلى انخفاض التأين النوعي S . فإذا كان التأين النوعي لجسيمات ألفا يبلغ عدة آلاف في بداية الأثر ويتضاعف عند نهايته، فيلاحظ أن التأين النوعي للإلكترونات لا يتعدى 10 في بداية الأثر ويصل إلى حوالي المائة عند نهايته.

وطبقا لقوانين بقاء الطاقة والزخم (حفظ الطاقة والزخم) فإنه عند تصادم الجسيم الثقيل مع إلكترون المادة تنتقل نسبة ضئيلة جدا من طاقة الجسيم إلى الإلكترون لا تتجاوز $4m_0 / M$ ، حيث M كتلة الجسيم الثقيل. أما عند تصادم الإلكترون الساقط مع إلكترون المادة فيمكن أن تصل قيمة الطاقة المنتقلة من الإلكترون الساقط إلى إلكترون المادة نصف طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد. أي أنه في حالة الإلكترونات هناك احتمال لانتقال كمية كبيرة من طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد إلى أحد الإلكترونات المدارية. ويؤدي هذا إلى زيادة التبعثر في حالة الإلكترونات، بحيث يكون، عادة، أكبر بكثير من التبعثر في حالة الجسيمات الثقيلة. وبالإضافة إلى ذلك فإنه نظرا لصغر كتلة الإلكترون فإن التصادمات بين الإلكترون الساقط وإلكترونات ونوى المادة قد تؤدي إلى انكسار مسار الإلكترون الساقط. لذا يكون أثر الإلكترون الساقط في المادة عادة عبارة عن خط منكسر.

وعند زيادة طاقة الإلكترونات الساقطة فإنه بالإضافة إلى فقد الطاقة عن طريق التصادمات غير المرنة (إثارة وتأين ذرات المادة)

يمكن أن تفقد الإلكترونات الساقطة طاقتها في صورة إشعاعات تعرف باسم إشعاعات الانكباح (bresmsstrahlung radiation). وتقوم العملية الأخيرة (أي فقد الطاقة بالإشعاع) بالدور الأساسي في فقد طاقة الإلكترونات الساقطة كلما زادت طاقة هذه الإلكترونات .

وتفقد البوزيترونات طاقتها بالأسلوب نفسه. إلا أنه يوجد فرق جوهري بين البوزيترونات والإلكترونات عند نهاية الأثر. فبعد أن يفقد البوزيترون طاقته عند نهاية الأثر فإنه عند اصطدامه بإلكترون يفنيان معا (الإلكترون والبوزيترون) مكونين بذلك فوتونين من فوتونات جاما، وهي الظاهرة المعروفة بتلاشي المادة والمادة المضادة عند تلاقيهما (annihilation) .

3-3-2 فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة

Energy loss by inelastic collision

لا تختلف نظريات انتقال الطاقة في حالة الإلكترونات عن طريق التصادمات غير المرنة (الإثارة والتأين) عن مثيلاتها بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة. ويمكن الحصول على القيمة النظرية لقدرة الإيقاف للإلكترونات عندما تكون طاقتها صغيرة ($E < m_0C^2$) بالمقارنة بطاقة السكون لها، وذلك من العلاقة التالية:

$$(- dE/dx) = (4\pi e^4 / m_0 v^2) N Z [\ln (m_0 v^2 /2 I) + 0.15] \quad (3\text{-}9)$$

أما إذا كانت طاقة الإلكترونات كبيرة ($E > m_0c^2$) تكون القيمة النظرية لقدرة الإيقاف هي:

$$(- dE/ dx) = (2\pi e^4 / m_0 c^2) N Z [\ln (m_0 c^2 /2 I) + 0.15] \quad (3\text{-}10)$$

3-3-3 فقد الطاقة بالإشعاع Energy loss by radiation

طبقا لقوانين الكهروديناميكا، فإنه عند تعجيل (تسريع) جسيم مشحون فإن هذا الجسيم يصدر إشعاعات كهرومغناطيسية تتناسب شدتها مع مربع العجلة (التسارع). وعند مرور إلكترون بالقرب من نواة

شحنتها Z فإن مساره ينحرف. وهذا الانحراف هو بمثابة التعجيل. وينتج عن هذا التعجيل إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات الانكباح، تؤدي إلى فقد الإلكترون لجزء من طاقته. ولا يحدث هذا الفقد للطاقة على نواة الذرة فحسب، وإنما يحدث كذلك على الإلكترونات المدارية للذرة. وطيف إشعاعات الانكباح طيف مستمر، وهي تصاحب تفكك بيتا كما تصدر عن جميع أنابيب الأشعة السينية عند فقد الإلكترونات لطاقتها على مادة المصعد (الأنود).

ولحساب الطاقة التي يفقدها إلكترون في شكل إشعاع انكباح على وحدة الطول من المسار داخل المادة تستخدم العلاقة التالية:

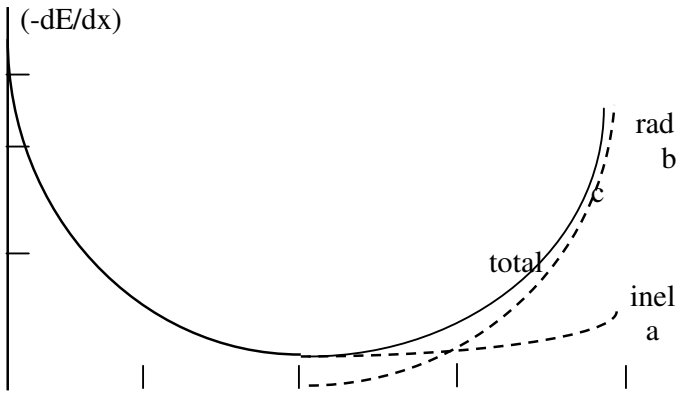
$$(-\,dE/dx)_{rad} = [4Z(Z+1)e^4\, NE\,/137\, m_0^2\, C^2]\,(\ln 183 Z^{-1/2} + 0.125) \qquad (3\text{-}11)$$

وهذه العلاقة التي تمثل قدرة الإيقاف عن طريق الإشعاع صالحة مادامت طاقة الإلكترونات كبيرة، أي ($E >> m_0\, c^2$). أما إذا كانت طاقة الإلكترونات صغيرة فإنه يمكن إهمال فقد الطاقة عن طريق الإشعاع.

وهكذا فإن قدرة الإيقاف الكلية بالنسبة للإلكترونات هي:

$$(-\,dE/dx)_{tot} = (-\,dE/dx)_{inel} + (-\,dE/dx)_{rad} \qquad (3\text{-}12)$$

ويوضح شكل (3–4) كيفية تغير قدرة الإيقاف عن طريق التصادمات غيرالمرنة $(-dE/dx)_{inel}$ وعن طريق الإشعاع $(-dE/dx)_{rad}$ وكذلك القدرة الكلية $(-dE/dx)_{tot}$ كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة،



0.01 0.1 1.0 10 100

E / mc^2

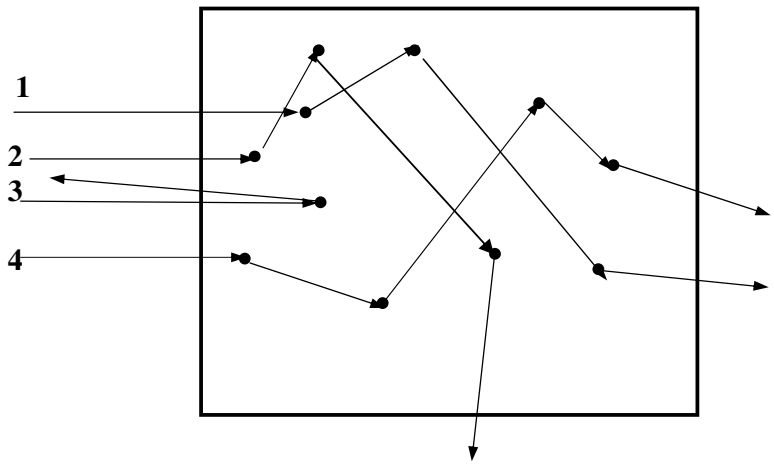
شكل (3–4)

تغير قدرة الإيقاف كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة

حيث يمثل المحور الأفقي نسبة طاقة الإلكترونات الساقطة E إلى طاقة السكون للإلكترون m_0c^2 ، ويمثل المنحنى a قدرة الإيقاف بالتصادمات غير المرنة والمنحنى b قدرة الإيقاف بالإشعاع أما منحنى c المستمر فيمثل القدرة الكلية للإيقاف.

3–3–4 امتصاص الإلكترونات Absorption of electrons

لاحظنا أن سلوك الإلكترونات عندما تسقط على المادة يختلف اختلافا كبيرا عن سلوك الجسيمات الثقيلة. وتتمثل بعض نواحي هذا الاختلاف في أن أثر الإلكترون في المادة لا يكون على شكل خط مستقيم كما هو الحال بالنسبة للجسيمات الثقيلة ولكن يكون في صورة كالمبينة بشكل(3–5) ، بالإضافة إلى ذلك فإن طول أثر الإلكترون يختلف كليا عن مداه (فالمدى عبارة عن المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم في اتجاه سقوطه حتى يتوقف). لذا، فإن مفهوم المدى بالنسبة لإلكترون معين غير وارد.



شكل (3-5)
أثر الإلكترونات في المادة

وهكذا فإنه عند سقوط حزمة متوازية من الإلكترونات ذات طاقة واحدة على مادة ما (تسمى بالمادة الماصة (absorber) ، وإذا كان سمك هذه المادة غير كاف لامتصاص هذه الإلكترونات، فإن الإلكترونات تخرج من الجانب الآخر للمادة بطاقات مختلفة اختلافا كبيرا. أي أن التبعثر الناتج في طاقات الإلكترونات يكون كبيرا للغاية بمقارنته بنظيره في حالة الجسيمات الثقيلة. وعموما يزداد التبعثر بزيادة سمك المادة الممتصة. بالإضافة إلى ذلك يمكن أن تكون زاوية التشتت الناتجة عن التصادم كبيرة بحيث يرتد الإلكترون إلى الخلف (الإلكترون رقم 3 في شكل 3-5). وتعرف هذه الظاهرة الأخيرة بالتشتت الارتدادي أو التشتت للخلف (back scattering). ويمكن أن يؤدي هذا التشتت الارتدادي إلى زيادة الشدة الإشعاعية المقيسة لمصادر بيتا عن الشدة الفعلية، وذلك عند وجود أجسام سميكة بالقرب من المصدر. لذا، يجب تقدير قيمة التشتت الارتدادي بعناية عند تحديد القيمة الحقيقية لشدة المصدر.

قانون الامتصاص

لما كانت أطياف بيتا الصادرة عن جميع النظائر المشعة هي أطياف مستمرة، ونظرا لما يحدث من تشتت للإلكترونات في المادة فإنه ينتج عن هذين العاملين حدوث امتصاص لهذه الجسيمات داخل المادة بطريقة أسية. ولقد وجد عمليا أن قانون الامتصاص لجسيمات بيتا يمكن كتابته بالتقريب المناسب في الصورة الآتية:

$$N = N_0 \, e^{-\mu x} \qquad (3\text{-}13)$$

حيث: N_0 هو عدد جسيمات بيتا الساقطة و N هو عدد الجسيمات بعد اختراق سمك من المادة الماصة مقداره x أما μ فيعرف بمعامل الامتصاص الخطي (linear absorption coefficient) ، وهو يعتمد أساسا على نوع المادة الماصة ويزيد بزيادة عددها الذري ووحدته سم$^{-1}$.

وعند قسمة معامل الامتصاص الخطي μ على كثافة المادة ρ الماصة نحصل على معامل جديد μ_m يعرف باسم معمل الامتصاص الكتلي (mass absorption coefficient)، أي أن:

$$\mu_m = \mu / \rho$$

ووحدة قياس معامل الامتصاص الكتلي هي سم^2/جرام، وهذا المعامل الأخير يختلف اختلافا طفيفا باختلاف النسبة Z/A للمادة الماصة. وعند استخدام معامل الامتصاص الكتلي في المعادلة (3-13) يجب التعبير عن السمك x بوحدة جديدة x_m تعبر عن السمك الكتلي وهي وحدة (جرام/سم^2) بدلا من السنتيمتر، أي أن:

$$x_m = x \rho$$

ولذلك، يلزم أن تكون وحدة $x \rho$ في هذه الحالة سم^2/جم

السمك النصفي $x_{1/2}$ The half-thickness

يستخدم مصطلح السمك النصفي $\chi x_{1/2}$ (the half-thickness) أو طبقة السمك النصفي (The half value layer HVL) استخداما واسعا عند حساب امتصاص الإلكترونات. والسمك النصفي عبارة عن السمك المعين من المادة الذي يحدث خلاله امتصاص نصف عدد الجسيمات الساقطة ويخترق النصف الآخر، أي أنه ذلك السمك الذي يؤدي إلى خفض الشدة الإشعاعية أو عدد الجسيمات التي تخترقه إلى النصف، أي أن:

$$N = ½ N_0$$

وباستخدام العلاقة (3-13) نجد أن:

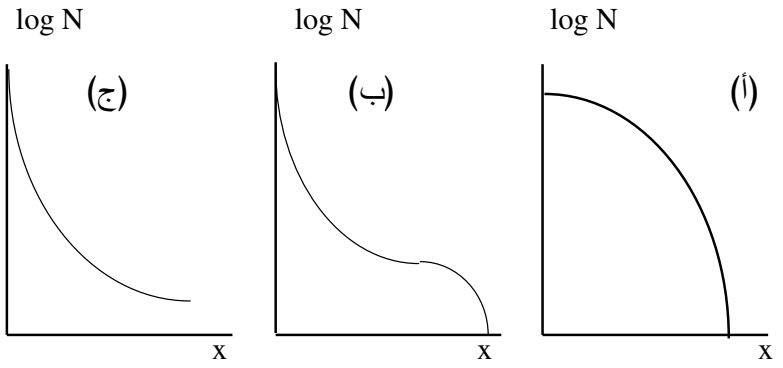
$$x_{1/2} = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu \ (cm) \qquad (3\text{-}15)$$

$$x_{m1/2} = \ln 2 / \mu_m = 0.693 \ \rho / \mu \ gm/cm^2) \qquad (2\text{-}16)$$

3-3-5 تحديد مدى الإلكترونات من منحنى الامتصاص

Range determination from the absorption curve

ذكرنا أن مفهوم المدى لإلكترون معين غير وارد. أما بالنسبة لعدد كبير من الإلكترونات فإنه يمكن تحديد المدى تجريبيا. ولهذا الغرض، يجب قياس عدد الجسيمات N كدالة من سمك المادة الممتصة x. ولتنفيذ ذلك يتم تثبيت كل من مصدر جسيمات بيتا والكاشف على مسافة مناسبة، وتوضع بينهما ألواح من المادة المعنية ذات كثافة مختلفة. ويتم قياس معدل العد عند كل سمك .



شكل (3–6)

أ – منحنى امتصاص لمصدر بيتا نقي.

ب– منحنى الامتصاص لمصدر بيتا مركب

ج– منحنى الامتصاص لمصدر بيتا يصدر في الوقت نفسه إشعاعات جاما

ويتم قياس معدل العد عند كل سمك. ويزاد السمك حتى يصبح معدل العد مساويا للصفر ثم ترسم العلاقة بين كل من N ، x على ورق نصف لوغاريتمي . ويعرف المنحنى الناتج بمنحنى الامتصاص. ويبين شكل (3–6) ثلاثة منحنيات امتصاص لثلاثة مصادر بيتا مختلفة. الأول أ يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا نقي يصدر طيفا واحدا من جسيمات بيتا. والثاني ب يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا مركب أي يصدر عدة أطياف من جسيمات بيتا. وأما الثالث ج فهو يمثل منحنى الامتصاص لمصدر بيتا يصدر في الوقت نفسه إشعاعات جاما. ويبين الشكل (3–6أ) مدى الاختلاف بين المنحنى الواقعي للامتصاص وبين

العلاقة (3-13) التي تمثل في هذا المقياس خطا مستقيما. وعموما، يعتمد شكل منحنى الامتصاص المحدد تجريبيا على الوضع الهندسي للكاشف وعلى نوع مصدر بيتا. ولكن هذه العوامل لا تؤثر كثيرا على المدى الذي يمكن تحديده تجريبيا من نقطة تلاقي المنحنى بالمحور x، أي عندما يصبح عدد الجسيمات مساويا للصفر. وعموما، يصعب تحديد هذه النقطة لسببين:

السبب الأول وجود خلفية إشعاعية (background radiation) من جسيمات بيتا مصدرها الأشعة الكونية أو أي مصادر بيتا أخرى بعيدة. والسبب الثاني وجود نسبة من إشعاعات جاما صادرة من المصدر نفسه (المنحنى ج) أو في شكل خلفية إشعاعية. وتضيف الخلفية الإشعاعية ذيلا إلى منحى الامتصاص كالمبين في شكل (3-6ج) . لذا، فإنه يجب أن تطرح قيمة الخلفية الإشعاعية من جميع القراءات حتى يسهل إيجاد نقطة النهاية للمنحنى.

3-4 التفاعل المتبادل بين إشعاعات جاما والمادة
Interaction of gamma radiation with matter

3-4-1 انتقال الطاقة من إشعاعات جاما إلى المادة

تختلف أساليب انتقال الطاقة من إشعاعات جاما إلى المادة اختلافا جوهريا عن تلك الأساليب التي تنتقل بها الجسيمات المشحونة إلى المادة. فعندما يسقط فوتون جاما على المادة فإنه يمكن أن يفقد طاقته ويمنحها للمادة عن طريق إحدى العمليات الثلاث الرئيسة التالية:

أ- **التأثير الكهروضوئي (The photoelectric effect)**: وخلاله يفقد فوتون جاما طاقته بالكامل ويمنحها لأحد الإلكترونات شديدة الإرتباط بنواة ذرة من ذرات المادة، أي لأحد إلكترونات القشرات (المدارات) الداخلية للذرة، وبالتالي يفني هذا الفوتون.

ب- **تأثير كومبتون (Compton effect)** : وخلاله يفقد فوتون جاما جزءا من طاقته ويمنحها لأحد الإلكترونات الحرة أو ضعيفة الارتباط

بالذرة (أي أحد إلكترونات المدارات الخارجية للذرة)، وبالتالي ينحرف هذا الفوتون عن مساره.

ج- إنتاج الأزواج (The pair production) : ويمكن أن يحدث عندما يقترب الفوتون اقترابا كبيرا من نواة الذرة ويتفاعل مع المجال الكهربائي الشديد لها. وخلال هذا التفاعل يفقد فوتون جاما طاقته بالكامل منتجا زوجا إلكترونيا – بوزيترونيا، وبالتالي يفنى هذا الفوتون. ولا يمكن أن يحدث هذا النوع من التفاعل مع المجال الكهربائي لنواة الذرة إلا إذا كانت طاقة الفوتون أعلى من 1.022 إلكترون فولت، وهي الطاقة اللازمة لإنتاج كتلتي السكون لكل من الإلكترون والبوزترون.

وينبغي التأكيد على أن العمليتين الأولى والثانية يمكن أن تحدثان عند جميع طاقات الإشعاعات الكهرومغناطيسية بما في ذلك الأشعة السينية (x-ray) وإشعاعات الانكباح. أما العملية الثالثة فلا يمكن أن تحدث إلا إذا تجاوزت طاقة الأشعة الكهرومغناطيسية الطاقة المحددة أعلاه. وبالإضافة إلى ذلك، هناك عدة عمليات نووية أخرى للتفاعل بين إشعاعات جاما والأشعة السينية سوف ترد في نهاية هذا الجزء، وذلك بسبب عدم أهميتها من وجهة نظر امتصاص أشعة جاما والأشعة السينية في المادة.

3-4-2 توهين إشعاعات جاما في المادة

Attenuation of gamma radiation in matter

عند سقوط حزمة متوازية من إشعاعات جاما أو الأشعة السينية على المادة الممتصة يخرج الفوتون الذي يتفاعل مع أحد ذرات المادة – بأي من العمليات الثلاث – من الحزمة وذلك بسبب امتصاص طاقته بالكامل وفنائه (خلال عمليتي التأثير الكهروضوئي أو إنتاج الأزواج) أو بسبب تشتته أو انحرافه عن مساره (تأثير كومبتون). بذلك، يكون عدد الفوتونات dN التي تخرج من الحزمة متناسبا طرديا مع عدد الفوتونات الساقطة N_0 ومع سمك المادة الموهنة (الممتصة) dx ، أي أن:

$$dN = - \mu N_0 dx \qquad (3\text{-}17)$$

حيث: μ هو ثابت التناسب ويعرف باسم معامل التوهين الخطي (linear attenuation coefficient) وهو يختلف قليلا عن معامل الامتصاص الخطي (linear absorption coefficient). أما الإشارة السالبة فتعني تناقص عدد الفوتونات التي تخترق المادة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة (أي زيادة عدد الفوتونات الخارجة من الحزمة كلما زاد سمك المادة الممتصة). وعموما، جرى العرف على استخدام شدة الإشعاعات I بدلا من عدد الفوتونات N . لذلك، يفضل كتابة المعادلة (3-17) في الشكل التالي:

$$dI = - \mu I_0 \, dx \qquad (3\text{-}18)$$

وعند تكامل طرفي المعادلة (3-18) نحصل على العلاقة المعروفة التالية:

$$I = I_0 \, e^{-\mu\mu x} \qquad (3\text{-}19)$$

حيث: I_0 هي شدة الإشعاعات الساقطة على المادة، I هي شدة الإشعاعات التي اخترقت سمكا من المادة مقداره x ولا تشمل أية إشعاعات ثانوية قد تنتج بسبب التفاعل داخل هذا السمك.

وكما سيتضح فيما بعد يعتمد معامل التوهين الخطي $\mu\mu$ على طاقة إشعاعات جاما وعلى نوع المادة. لذلك، فإنه عندما تحتوي حزمة إشعاعات جاما على خليط من طاقات مختلفة فإنه يمكن حساب شدة الإشعاعات المخترقة لكل طاقة على حدة باستخدام العلاقة (3-19). وبذلك، تصبح الشدة الكلية بعد الاختراق هي:

$$I_t = \sum_i I_{oi} \, e^{- \mu_i(E) \, x} \qquad (3\text{-}20)$$

ويرتبط معامل التوهين الخطي μ بعدد الذرات n الموجودة في اسم^3 من المادة الممتصة وبالمقطع العرضي الكلي σ (E) لتفاعل الفوتونات مع المادة. فمعدل التوهين بالنسبة للتغلغل (أي التوهين في اسم من المادة) يتناسب مع شدة الفوتونات الساقطة I_0 ومع كل من عدد الذرات في وحدة الحجم (1اسم^3) n ، والمقطع العرضي الكلي σ، أي أن:

$$- dI / dx = n \sigma (E) I_0 \qquad (3\text{-}21)$$

وبمقارنة هذه العلاقة الأخيرة بالعلاقة (3–18) يتضح أن:

$$\mu(E) = n \sigma (E) \qquad (3\text{-}22)$$

أي أن معامل التوهين الخطي μ هو عبارة عن حاصل ضرب عدد الذرات في اسم^3 من المادة في المقطع العرضي الكلي σ (E) عند الطاقة المعينة E .

وقد سبق تعريف المقطع العرضي σ (E) لتفاعل ما بأنه احتمال حدوث هذا التفاعل إذا سقط جسيم واحد على ذرة واحدة موجودة في مقطع مساحته 1 سم^2. ولما كانت إشعاعات جاما تتفاعل مع المادة عن طريق العمليات الثلاث المذكورة فإن تعريف المقطع العرضي الكلي لها هو عبارة عن مجموع المقاطع العرضية لكل نوع على حدة، أي أن:

$$\sigma (E) = \sigma_{ph} (E) + \sigma_c (E) + \sigma_p (E) \qquad (3\text{-}23)$$

حيث: σ_{ph}(E)، σ_c (E) ، σ_p (E) هي المقاطع العرضية للتأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون وإنتاج الأزواج بالترتيب. لذا، فإنه يمكن كتابة معامل التوهين الخطي μ كالتالي:

$$\mu (E) = n \{ \sigma_{ph} (E) + \sigma_c (E) + \sigma_p (E) \}$$

أي أن:

$$\mu(E) = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p \qquad (3\text{-}24)$$

أي أن معامل التوهين الخطي μ لمادة معينة عند طاقة معينة E هو عبارة عن مجموع معاملات التوهين الجزئية لكل من التأثير الكهروضوئي μ_{ph} ، وتأثير كومبتون μ_c ، وإنتاج الأزواج μ_p عند هذه الطاقة.

وكثيرا ما تستخدم معاملات توهين أخرى تعرف باسم معامل التوهين الكتلي (The mass absorption coefficient) أو معامل التوهين الذري (The atomic absorption coefficient). وترتبط هذه المعاملات الأخيرة بمعامل التوهين الخطي بالعلاقات التالية:

$$\mu_{mass} = \mu / \rho \quad (cm^2 / gm) \qquad (3\text{-}25)$$

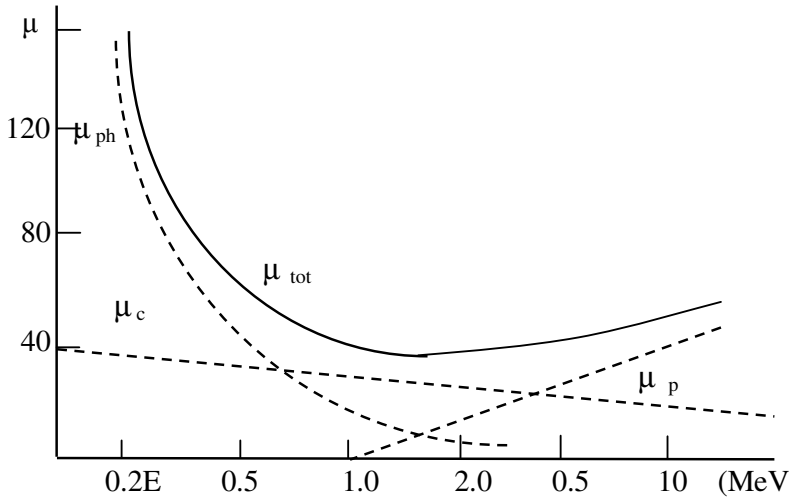
$$\mu_{atom} = (\mu / \rho) . (A/N_a) \qquad (3\text{-}26)$$

حيث ρ هي كثافة المادة الماصة، A عددها الكتلي، N_a هو عدد أفوجادرو ($10x6.02^{23}$ ذرة لكل جرام ذري).

وتعتمد معاملات التوهين الجزئية للتأثير الكهروضوئي μ_{ph}، ولتأثير كمبتون μ_c، ولإنتاج الأزواج μ_p اعتمادا كبيرا على طاقة إشعاعات جاما. وبصفة عامة، فإنه عندما تكون طاقة إشعاعات جاما أقل من 0.2 ميغا إلكترون فولت يكون μ_{ph} عاليا جدا في حين يكون μ_p مساويا للصفر. أي أن التأثير الكهروضوئي يشكل عندئذ الوسيلة الرئيسة لتوهين الفوتونات ذات الطاقة المنخفضة حيث يكون معامل التوهين الخطي لتأثير كمبتون μ_c أقل من معامل التوهين للتأثير الكهروضوئي μ_{ph}. وبزيادة طاقة إشعاعات جاما ينخفض μ_{ph} انخفاضا سريعا في حين يكون انخفاض μ_c بزيادة الطاقة بطيئا. لذلك، يصبح تأثير كومبتون ذا أهمية أكبر عند الطاقات في حدود1 ميغا إلكترون فولت. أما إنتاج الأوزاج فلا يحدث إطلاقا إذا كانت طاقة إشعاعات جاما أقل من 10.22 ميغا إلكترون فولت (حيث أن الطاقة التي يلزم تحولها إلى كتلة لتكوين الزوح الإلكتروني البوزيتروني هي 10.22 ميغا إلكترون فولت). ولكن بزيادة طاقة إشعاعات جاما فإنه سرعان ما تصبح عملية إنتاج الأزواج أهم عملية بين العمليات الثلاثة. ويوضح شكل (3–7) كيفية تغير كل من μ_{ph} ، μ_c ، μ_p كدالة من الطاقة بالنسبة لعنصر الرصاص. كما يبين أهمية كل من العمليات الثلاث عند الطاقة المعينة. ويمثل المنحنى المستمر في هذا الشكل معامل التوهين الكلي لعنصر الرصاص كدالة من الطاقة. وجدير بالذكر أن استخدام معامل التوهين الكلي لحساب سمك الحواجز الواقية من إشعاعات جاما ليس دقيقا. ويعود ذلك أولا لاختلاف هذا المعامل باختلاف الطاقة. والسبب الآخر والأهم هو تكون إشعاعات ثانوية داخل المادة ذاتها (نتيجة تأثير كومبتون وإنتاج الأزواج). وقد يكون السمك المحسوب أقل من السمك اللازم لتوهين تلك الإشعاعات خاصة وأنها تتكون على أعماق مختلفة من الحاجز. كذلك، تجدر الإشارة إلى أن التأين النوعي الناتج عن إشعاعات جاما أقل بكثير من

ذلك الناتج عن الجسيمات المشحونة. وهذا التأين ناتج أساسا عن الإلكترونات الثانوية التي انطلقت بعد أن منحتها إشعاعات جاما كل طاقتها أو جزءا منها. لذلك، نجد أن قدرة إشعاعات جاما على الاختراق كبيرة للغاية بالمقارنة بقدرة الإلكترونات، وبالتالي بالمقارنة بقدرة الجسيمات المشحونة الثقيلة.

وفي بعض الأحيان يستخدم اصطلاح السمك النصفي من المادة $x_{1/2}$ (half-thickness) أو HVL (half-value layer) وهو عبارة عن سمك المادة المعينة اللازم لخفض شدة الإشعاعات إلى النصف، أي أن:



شكل (3-7)

تغير كل من μ_{ph}، μ_c، μ_p، μ_{tot} ، كدالة من الطاقة لعنصر الرصاص

$$I_x / I_0 = ½ = e^{-\mu \times 1/2}$$

وبالتالي فإن السمك النصفي هو:

$$x_{1/2} = \ln 2 / \mu = .693 / \mu \quad (\text{cm}) \qquad (3\text{-}27)$$

3-4-3 التأثير الكهروضوئي The photoelectric effect

ذكرنا أن التأثير الكهروضوئي هو أحد عمليات تفاعل إشعاعات جاما مع المادة. فنتيجة للتصادم المباشر بين الفوتون الساقط وأحد الإلكترونات المرتبطة بالذرة تنتقل طاقة الفوتون بأكملها إلى ذلك الإلكترون الذي ينطلق تاركا ذرته. ويسمى هذا الإلكترون المنطلق بالإلكترون الكهروضوئي (the photoelectric electron) . ويمكن التعبير عن طاقة الإلكترون المنطلق طبقا لقانون بقاء الطاقة بالعلاقة التالية:

$$E_e = E_\gamma - B = h\nu - B$$

حيث E_e هي طاقة الإلكترون المنطلق ، E_γ طاقة الفوتون الساقط وهي تساوي $h\nu$ ،حيث: h ثابت بلانك، ν تردد الإشعاع . أما B فهي عبارة عن طاقة ترابط الإلكترون بالذرة. لذا لا يحدث هذا الأثر إلا إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من طاقة ترابط الإلكترون بالذرة، أي أن: $h\nu > B$. فالفوتونات التي تكون طاقتها أكبر بقليل من طاقة ترابط الإلكترون بالذرة تحدث الأثر الكهروضوئي مع إلكترونات المدارات الخارجية للذرة نظرا لترابطها الضعيف بنواة الذرة. وبزيادة طاقة الفوتونات فإنها تحدث الأثر الكهروضوئي على الإلكترونات الأكثر ترابطا بنواة الذرة إلى أن تصبح طاقة الفوتون أكبر من ترابط الإلكترون في المدار K (أي $h\nu > B_K$)، عندئذ يمكن أن تشترك جميع إلكترونات الذرة في التأثير الكهروضوئي ويجب ملاحظة أنه لا يمكن حدوث التأثير الكهروضوئي على الإلكترونات الحرة، نظرا لعدم تحقق قانون بقاء الزخم (في حالة الإلكترون المترابط بالذرة يتحقق قانون بقاء الزخم حيث تحمل الذرة عند انطلاق الإلكترون الجزء الباقي من الزخم). وعند خروج إلكترون من المدار K يحل محله إلكترون آخر من المدار L وبالتالي تنطلق من الذرة إشعاعات سينية مميزة لها، التي هي عبارة عن فرق طاقتي الترابط في المدارين K ، L ، أي أن:

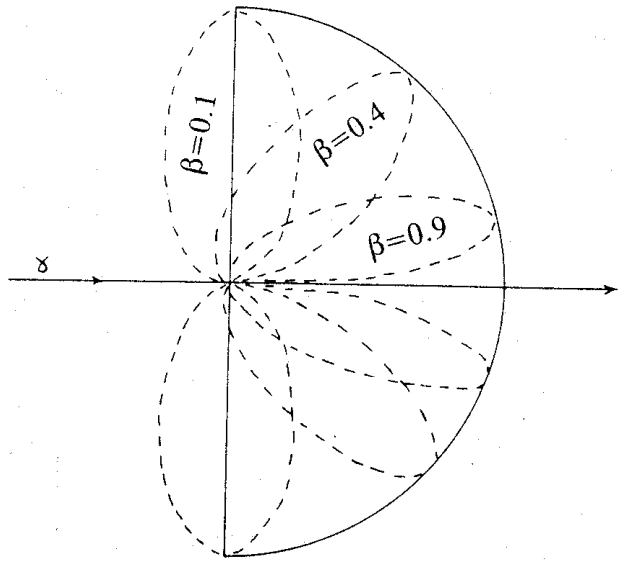
$$h\nu_1 = B_K - B_L$$

وحتى الآن يصعب إيجاد علاقة نظرية لتعيين قيمة المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي σ_{ph}. لذا، يتم تعين قيم هذا المقاطع عمليا من منحنيات كالمبينة في شكل(3–7). ومع ذلك توجد علاقة شبه نظرية لتحديد قيم المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي في حالة انطلاق الإلكترون من المدار K وهذه العلاقة هي:

$$\sigma_{ph}(k) = 1.068 \times 10^{-32} Z^5 [(m_0 c^2 / h\nu)]^{7/2} \quad cm^2 \qquad (3\text{-}29)$$

حيث: Z هو العدد الذري للمادة الممتصة، c سرعة الضوء في الفراغ، m_0 كتلة السكون للإلكترون، ν هو تردد الفوتون الساقط. ولا تصلح هذه العلاقة الأخيرة للاستخدام عند زيادة طاقة الفوتونات. فعندما تصبح طاقة الفوتون $m_0 c^2 << h\nu\nu$ تتخذ العلاقة (3–29) الشكل التالي:

$$\sigma_{ph}(k) \approx 1.068 \times 10^{-32} Z^5 (m_0 c^2 / h\nu) \quad cm^2 \qquad (3\text{-}30)$$



شكل (٣ - ٨)

اتجاهات انطلاق الإلكترون الكهروضوئي عند قيم مختلفة للمعامل β

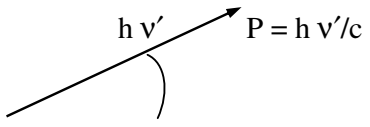
ويلاحظ من العلاقة (3–29) السابقة أن المقطع العرضي للتأثير الكهروضوئي يتناسب طرديا مع Z^5 للمادة الممتصة. لذلك ،تفضل العناصر ذات العدد الذري الكبير كالرصاص واليورانيوم لعمل الدروع والحواجز الواقية من إشعاعات جاما خاصة عند الطاقات المنخفضة لهذه الإشعاعات.

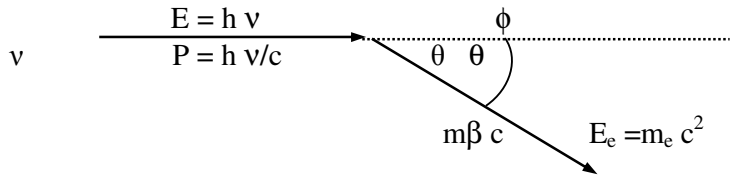
وعندما تكون طاقة الفوتونات صغيرة يكون احتمال انطلاق الإلكترون الكهروضوئي أكبر ما يكون في اتجاه عمودي على اتجاه السقوط. وبزيادة طاقة الفوتون يزداد احتمال انطلاق الإلكترون مكونا زاوية أقل من 90° درجة بالنسبة لاتجاه السقوط. وعند الطاقات العالية جدا يصبح انطلاق الإلكترونات أكبر ما يكون في اتجاه قريب من اتجاه السقوط. ولكن لا ينطلق الإلكترون الكهروضوئي إطلاقا في اتجاه سقوط الفوتون بسبب قانون بقاء الزخم. ويبين شكل (3–8) اتجاهات انطلاق الإلكترون الكهروضوئي عند قيم مختلفة للمعامل $\beta = v / c$ ، حيث v سرعة الإلكترون عند الانطلاق ، c سرعة الضوء في الفراغ.

3–4–4 تأثير كومبتون Compton effect

بينما لا يحدث التأثير الكهروضوئي إلا على الإلكترونات المرتبطة بالذرة ارتباطا شديدا، فإنه يمكن أن يحدث تأثير كومبتون على الإلكترونات الحرة أو الإلكترونات ضعيفة الارتباط بالذرة. ويتلخص هذا التأثير في أنه عند سقوط فوتون طاقته $h\nu$ على إلكترون حر يكتسب الإلكترون جزءا من هذه الطاقة فينطلق بسرعة معينة بينما يفقد الفوتون هذه الطاقة وتصبح طاقته $h\nu'$ ، ويتشتت (يحيد) بالتالي عن مساره. ويوضح شكل (3–9) هذه العملية حيث تظهر قيمة طاقة وزخم كل جسيم قبل وبعد التشتت. وترمز m لكتلة الإلكترون بعد تشتته. وهذه الكتلة مرتبطة بكتلته عند السكون بالعلاقة المعروفة:

$$m = m_0 / (1 - \beta)^{1/2}$$





شكل (3–9)
طاقة ووزخم الفوتون والإلكترون قبل وبعد تشتت كومبتون

وحيث أنه لا يشترك في التصادم إلا الفوتون والإلكترون فإنه يمكن كتابة معادلات بقاء الطاقة والزخم (كمية الحركة) في الاتجاهين الأفقي والرأسي بالتتابع بالمعادلات (3–32) الثلاثة االتالية:

$$h\nu = h\nu'ύ + mc^2 - m_0 c^2$$

$$h\nu = (h\nu'/c)\cos\phi + m\beta c \cos\theta\theta \qquad \} \quad (3\text{-}32)$$

$$0 = (h\nu'/c)\sin\phi - m\beta c \sin\phi\theta$$

وبحل هذه المجموعة من المعادلات يمكن إيجاد قيمة طاقة الفوتون المتشتت والعلاقة بين زاوية تشتت الفوتون وزاوية انطلاق الإلكترون على النحو التالي:

$$h\nu' = h\nu / [\, 1 + \gamma (1\text{-}\cos\phi) \,] \qquad (3\text{-}33)$$

حيث:

$$\gamma = h\nu / m_0 c^2$$

$$\cos\theta = - (1 + \gamma) \tan(\phi/2) \qquad (3\text{-}34)$$

وتجدر الإشارة إلى أن الفوتون يمكن أن يتشتت بزوايا مختلفة وتعتمد طاقته $h\nu'$ بعد التشتت على زاوية تشتته ϕ فكلما زادت زاوية تشتته قلت طاقته وهو ما توضحه العلاقة (3–33).

وقد تمكن كل من كلين ونيشينا (Klien and Nishina) من حساب المقطع العرضي لتشتت كومبتون σ_c نظريا، وحددا هذا المقطع بالعلاقة التالية:

$$\sigma_c = (\pi e^4/m_0^2 c^4) (1/\gamma) \{[1-2(\gamma+1)/ \gamma^2] \ln(2\gamma+1)+1/2+4/\gamma-1/2(2\gamma+1)^2\} \quad (3\text{-}35)$$

وهكذا يتضح أن المقطع العرضي لأثر كومبتون σ_c يقل بالتدريج عند زيادة طاقة الفوتون الساقط،

ويمكن الحصول على معامل التوهين الخطي لأثر كومبتون μ_c وذلك بمعرفة كل من المقطع العرضي لتأثير كمبتون σ_c وعدد الإلكترونات N في كل 1 سم^3 من المادة الماصة وهو يساوي $N = n Z$: أي أن

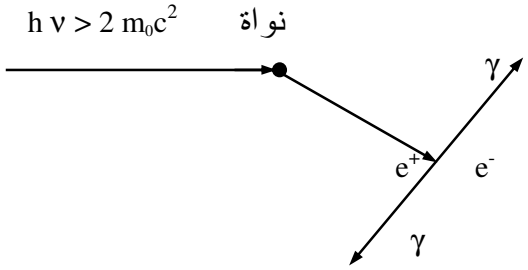
$$\mu_c = n Z \sigma_c \quad (3\text{-}36)$$

حيث n هي عدد الذرات في 1 سم^3 و Z هو العدد الذري للمادة المعينة.

3-4-5 إنتاج الأزواج The pair production

من المعروف أن طاقة السكون للإلكترون هي m_0c^2 = 0.511 ميغا إلكترون فولت. وعندما تكون طاقة الفوتون الساقط أكبر من ضعف هذه القيمة (أي أكبر من 1.022 إلكترون فولت)، فإنه يحدث تفاعل بين الفوتون الساقط والمجال الكهربي للنواة ينتج عنه فناء الفوتون وتولد (أو إنتاج) إلكترون سالب وبوزيترون موجب ينطلقان بطاقتي حركة للإلكترون والبوزترون T_+, T_- على الترتيب. ويبين الشكل (3-10) رسما توضيحيا لهذه العملية. وباستخدام قانون بقاء الطاقة يسهل إيجاد طاقتي الحركة لكل من الإلكترون والبوزيترون، حيث أن:

$$h\nu - 2 m_0 c^2 = T_- + T_+ \quad (3\text{-}37)$$



شكل (3–10)
رسم توضيحي لعملية إنتاج الزوج
الإلكتروني البوزتروني ثم فناء البوزترون

فعلى سبيل المثال، إذا كانت طاقة الفوتون الساقط 10 ميغا إلكترون فولت فإنه يستغل من هذه الطاقة ما مقداره 1.022 ميغا إلكترون فولت في إنتاج كتلتي الإلكترون والبوزيترون، وتوزع القيمة الباقية من الطاقة، وهي 10 – 1.022 = 8.978 ميغا إلكترون فولت في شكل طاقة حركية لكل من الإلكترون والبوزيترون. ومن حيث المبدأ، يمكن أن تتوزع الطاقة الباقية بين الإلكترون والبوزيترون بنسب مختلفة. ولكن وجد إحصائيا أن طاقة البوزيترون تكون أكبر بقليل من طاقة الإلكترون لأن البوزيترون يتنافر مع النواة في حين يتجاذب الإلكترون معها.

وقد وجد أنه يمكن حساب المقطع العرضي $\sigma\sigma_p$ لإنتاج الأزواج بطريقة عددية لبعض المواد بالمعادلة التالية:

$$\sigma_p = 5.93\ \ Z^2\ x\ 10^{-28} \qquad \text{(barn)} \qquad (3\text{-}38)$$

وأما بالنسبة لباقي المواد فإنه يمكن استخدام العلاقة نفسها أو استخدام الجداول أو القيم التجريبية من المنحنيات كالموضح في شكل(3–7). ويتضح من العلاقة (3–38) أن المقطع العرضي لإنتاج الأزواج σ_p يتناسب مع مربع العدد الذري، أي مع Z^2 للمادة الماصة. وهذا ما يؤكد أفضلية العناصر الثقيلة عند عمل الحواجز الواقية من

إشعاعات جاما عند الطاقات العالية لهذه الإشـــعاعات. ويمكـــن تحديـــد معامل التوهين الخطي لإنتاج الأزواج بدلالة عدد الذرات (النوى) n في ا سم^3 والمقطع العرضي لإنتاج الأزواج σ_p من العلاقة:

$$\mu_p = n\,\sigma_p \quad (cm^{-1}) \qquad (3\text{-}39)$$

3-6-4 التشتت النووي التجاوبي وأثر موسباور

The nuclear resonance scattering and the Mossbauer effect

بالإضافة إلى الأساليب الرئيسة السابقة يمكن أن تحـــدث عـــدة أنواع أخرى من التفاعلات المتبادلة بين إشعاعات جاما وبين المادة، تفقد عن طريقها هذه الإشعاعات طاقتها. ومن أمثلة هذه التفاعلات ما يعرف باسم التفاعل النووي بالفوتونات (photonuclear reaction) حيث تمـــتص النواة الفوتون الساقط وينتج عن هذا الامتصاص خروج جسيم من النواة كالنيوترون أو البروتون أو غيرهما. كذلك، يعتبـــر التشـــتت النـــووي التجاوبي للفوتونات أحد أنواع تفاعلات الفوتونات الساقطة مع المـــادة. وتعتبر جميع هذه التفاعلات مهملة من وجهة نظر امتصـــاص المـــادة للفوتونات وذلك لصغر مقاطعها العرضية بالمقارنة بكـــل مـــن التـــأثير الكهروضوئي أو تشتت كوميتون أو إنتاج الأزواج.

ومع ذلك يعتبر التشتت النووي التجـــاوبي (nuclear resonance scattering) ذا أهمية خاصة لارتباطه بالظاهرة المعروفة باســـم تـــأثير موسباور. ويتلخص التشتت النووي التجاوبي في أنه إذا كانـــت طاقـــة الفوتون الساقط تماثل طاقة الإثارة لأحد مستويات (حالات النواة الطاقية) يمكن أن تمتص النواة هذا الفوتون وتنتقل بذلك من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة ذات الطاقة المحددة. ويقال في هذه الحالـــة إنـــه حـــدث للفوتون امتصاص تجاوبي في النواة (resonance absorption). فإذا انبعث الفوتون من جديد من النواة المثارة (حتى تعود إلى الحالـــة الأرضـــية) كانت طاقته أقل بمقدار ضئيل للغاية من طاقة الفوتون الممتص، حيـــث تحمل النواة المرتدة هذه الطاقة الصغيرة للغاية والمعروفة باســـم طاقـــة الارتداد. لذلك، فإن هذا الفوتون المنبعث من جديد من النواة لا يمكن أن يعاد امتصاصه بواسطة نواة من النوع نفسه لأن طاقته أصبحت أقل من

طاقة الامتصاص التجاوبي. ولما كانت طاقة الارتداد صغيرة للغاية فإنه يمكن أن يعاد امتصاص الفوتون المنبعث إذا أ ضيف للنواة المماثلة طاقة تساوي تماما طاقة الارتداد. وتعرف هذه الظاهرة باسم تأثير موسباور. ويعتبر تأثير موسباور فائق الحساسية لأي تغيرات طفيفة في طاقة الفوتون المنبعث نظرا لصغر طاقة الارتداد. وبسبب حساسيته الفائقة يستخدم تأثير موسباور في إجراء القياسات التي تتطلب حساسيةعالية.

3-5 التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة

Interaction of neutrons with matter

سبق أن تعرفنا على النيوترون وهو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة كتلته 1.0866 و ك ذ (939.52 ميغا إلكترون فولت). وتصنف النيوترونات تبعا لطاقتها الحركية إلى الأنواع التالية:

نيوترونات حرارية ونيوترونات بطيئة: النيوترونات الحرارية هي النيوترونات التي تقل طاقتها الحركية عن حوالي 1 إلكترون فولت في حين أن النيوترونات البطيئة هي التي تتراوح طاقتها بين 1 إلكترون فولط، 0.1 كيلو إلكترون فولت.

نيوترونات بينية الطاقة: هي النيوترونات التي تتراوح طاقتها بين 0.1 ، 20 كيلو إلكترون فولت.

نيوترونات سريعة: هي النيوترونات التي تتراوح طاقتها بين 0.2 – 10 ميغا إلكترون فولت.

نيوترونات عالية الطاقة: هي النيوترونات التي تزيد طاقتها على 10 ميغا إلكترون فولت.

ونظرا لعدم وجود شحنة للنيوترون فإنه يتميز بخصائص تختلف كثيرا عن خصائص الجسيمات المشحونة. ومن هذه الخصائص أنه لا يمكن تعجيله (تسريعه) ولا يمكن أن يؤين النيوترون ذرات المادة ولا يحدث عنه أية تفاعلات كهروستاتيكية مع النواة أو الإلكترونات. لذا، فإنه إن لم يتفاعل النيوترون تفاعلا نوويا مع نوى الذرات تكون المادة بالنسبة لهذا النيوترون كالفراغ، مما يجعل له قدرة كبيرة على اختراق

المادة. ويتفكك النيوترون تلقائيا بعد خروجه من النـــواة إلـــى بروتـــون وجسيم بيتا ونيوترينو مضاد وفقا لتفاعل التفكك:

$$^{o}n \longrightarrow P^{+} + \beta^{-} + \acute{\upsilon}$$

ويبلغ عمره النصفي 15 دقيقة.

3-5-1 مصادر النيوترونات The neutron sources

لا توجد في الطبيعة نظائر طبيعية مشعة للنيوترونـــات. ولكـــن أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج نظير الكاليفورينوم 252($^{252}_{98}Cf$) الذي يعتبر حتى الآن النظير الصناعي الوحيد للنيوترونات بعمر نصف يبلـــغ 2.65 سنة. وقد استخدمت التفاعلات النووية المختلفة، خاصـــة تفاعـــل جسيم ألفا نيوترون (α,n) على العناصر الخفيفة كمصدر للنيوترونات منذ الثلاثينيات. وحتى الآن تعتبر هذه التفاعلات مع تفـــاعلات الانشـــطار والاندماج النووي هي المصادر الوحيدة للنيوترونات، ولنستعرض بعض هذه المصادر.

أ- مصدر الكاليفورنيوم Californium 252 Sources

يتم إنتاج الكاليفورنيوم 252 في الوقت الحالي فـــي المفـــاعلات النووية. ويتفكك نظير الكاليفورنيوم 252 تلقائيا مصدرا جسيم ألفا أحيانا وقد يتفكك مصدرا نيوترونا طبقا للمعادلة:

$$^{252}_{98}Cf \longrightarrow {}^{251}_{98}Cf + {}^{1}_{0}n$$

ويبلغ معدل الانبعاث النيوتروني 2.3×10^{6} نيوترونا في الثانية لكل 1 ميكروجرام من الكاليفورنيوم 252 . وتنطلق النيوترونـــات مـــن الكاليفورنيوم 252 بطاقات تتراوح بين 1 – 6 ميغا إلكترون فولت.

ب- مصدر الراديوم – بريليوم Radium-beryllium source

يعتبر هذا المصدر من أرخص مصـــادر النيوترونـــات. وتنـــتج النيوترونات في هذا المصدر عند قذف نواة البريليـــوم 9 بجســـيم ألفـــا فينطلق نيوترون طبقا للتفاعل التالي:

$$\alpha + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + \mathrm{n} + 5.76\ \mathrm{MeV}$$

ويستخدم نظير الراديوم 226 (^{226}Ra) كمصدر لجسيمات ألفا وأحيانا يستخدم البولينيوم أو الرادون بدلا منه. ويحضر المصدر بخلط كمية من الراديوم مع كمية أخرى من مسحوق البريليوم. فعند خلط جرام واحد من الراديوم مع عدة جرامات من مسحوق البريليوم يمكن الحصول على مصدر نيوتروني يبلغ مردوده (Neutron yield) أي عدد النيوترونات المنبعثة منه في الثانية الواحدة حوالي 10^{6} نيوترون سريع في الثانية. ويجب وضع الخليط داخل كبسولة محكمة الإغلاق وغير قابلة للكسر حتى لا يحدث تلوث بمصادر جسيمات ألفا.

ومن المعروف أن الراديوم 226 يصدر جسيمات ألفا بطاقات محددة تقع بين 4.79 ، 7.68 ميغا إلكترون فولت. ونظرا لفقدان جسيمات ألفا لطاقتها أثناء مرورها في مسحوق البريليوم، لذا تتراوح طاقات النيوترونات الصادرة عن هذا المصدر بين 1،12ميغا إلكترون فولت. ولما كان العمر النصفي للراديوم 1600 سنة، لذلك، تظل شدة المصدر ثابتة لعدة مئات من السنين. ولهذا السبب، وكذلك للمشاكل المترتبة على مصدر الراديوم الذي يتفكك إلى غاز الرادون مما قد يودي إلى انفجار الكبسولة الحاوية وتسرب الراديوم المشع فقد توقف إنتاج هذه المصادر حاليا.

ج- مصدر البولونيوم بريليوم أو الأميريشيوم بريليوم

يستخدم في الوقت الحالي نظير البولونيوم 210 الذي يبلغ عمره النصفي 138 يوما ويعتبر مصدرا لجسيمات ألفا بدلا من الراديوم 226 لتحضير مصادر النيوترونات مع البريليوم. إلا أنه نظرا للعمر النصفي القصير نسبيا لنظير البولونيوم 210 فقد حل مصدر الأميريشيوم 241 محل الراديوم 226 والبولونيوم 210. وباتت الان مصادر الأميريشيوم241 بريليوم هي المصادر المتداولة في معظم التطبيقات الصناعية.

د- مصدر النيوترونات الفوتوني The photoneutron source

يتلخص مبدأ عمل هذا1 المصدر على قذف بعض النوى بالفوتونات فينتج عن ذلك انبعاث النيوترونات. ويقوم عمل معظم المصادر من هذا النوع على استخدام التفاعلين التاليين.

$$\gamma + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \longrightarrow 2\,\alpha + \mathrm{n} - 1.67\ \mathrm{MeV}$$

$$\gamma + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{n} - 2.23\ \mathrm{MeV}$$

وتتميز التفاعلات الناتجة عن قذف النوى بإشعاعات جاما بأنها عتبية (أي لا تتم إلا إذا زادت طاقة إشعاعات جاما الساقطة عن حد معين). فبالنسبة للتفاعل الأول يجب ألا تقل طاقة إشعاعات جاما عن 1.67 ميغا إلكترون فولت. أما بالنسبة للتفاعل الثاني فيجب ألا تقل طاقة الإشعاعات عن 2.23 ميغا إلكترون فولت.

وتتميز هذه المصادر بأن طاقة النيوترونات الصادرة منها تكون ذات قيمة محددة بعكس مصادر الراديوم بريليوم التي يكون طيف النيوترونات فيها مستمرا. ويمكن استخدام نظير الصوديوم 24 ($^{24}_{11}\mathrm{Na}$) كمصدر لإشعاعات جاما حيث تبلغ طاقة إشعاعات جاما الصادرة منه 2.76 ميغا إلكترون فولت. فعند وضع واحد جرام من الصوديوم 24 مع قطعة كبيرة من البريليوم 9 دون طحن (نظرا للقدرة العالية لإشعاعات جاما على الاختراق) يمكن الحصول منه على مصدر نيوتروني مردوده (أي شدته) حوالي 10^{6} نيوترون/ثانية، وطاقة النيوترونات المنبعثة منه حوالي 1.0 ميغا إلكترون فولت.

هـ معجلات الجسيمات المشحونة كمصادر للنيوترونات

Particle accelerators as neutron sources

يمكن الحصول على نيوترونات ذات طاقة محددة وذلك بقذف بعض النوى الخفيفة بالجسيمات المشحونة والمعجلة في معجل حتى طاقة معينة طبقا لبعض التفاعلات التالية:

$${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{n} + 3.29\ \mathrm{MeV}$$

$${}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{Li} \longrightarrow {}^{7}_{4}\mathrm{Be} + \mathrm{n} - 1.65\ \mathrm{MeV}$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + n + 17.6\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{12}_{6}C \longrightarrow ^{13}_{7}N + n - 0.26\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{9}_{4}Be \longrightarrow ^{10}_{5}B + n + 4.35\ MeV$$

وهكذا، فإنه يمكن اختيار التفاعل المناسب للحصول على النيوترونات ذات الطاقة المحددة. وبتغيير طاقة الجسيمات المعجلة يمكن تغيير طاقة النيوترونات للقيمة المطلوبة. وعموما، يستخدم التفاعل الثالث في عمل مصادر النيوترنات المعروفة باسم مولدات النيوترونات (neutron generators) . ولهذا الغرض يتم تعجيل الديوترونات لطاقة تصل إلى 150 كيلو إلكترون فولت ويقذف بها هدف من التريتيوم فتنبعث النيوترونات بطاقة 14.1 ميغا إلكترون فولت. ويمكن الحصول من مثل هذا المصدر على تدفق نيوتروني (neutronflux) تصل شدته إلى حوالي $10^{10} - 10^{12}$ نيوترون/ثانية. سم^2.

و – المفاعلات النووية The nuclear reactors

تعتبر المفاعلات النووية أقوى مصادر النيوترونات على الإطلاق حيث يمكن أن تتراوح كثافة النيوترونات داخل المفاعلات بين 10^{13} ، 10^{19} نيوترون /ثانية.سم^2. وتنتج النيوترونات في المفاعلات عن انشطار نوي اليورنيوم والبلوتونيوم نتيجة حدوث التفاعلات المتسلسلة داخله. وتجدر الإشارة إلى أن طيف النيوترونات داخل المفاعل يتراوح ما بين النيوترونات الحرارية والسريعة.

3-5-2 التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة

يختلف التفاعل بين النيوترونات والمادة اختلافا كاملا بالمقارنة بتفاعل الجسيمات المشحونة أو إشعاعات جاما. فالنيوترونات تفقد طاقتها نتيجة تفاعلها مع النواة فقط. ويعتبر التشتت المرن وغير المرن أهم السبل التي يفقد خلالها النيوترون طاقته. ويعتبر التشتت المرن على النوى الخفيفة أهم وسيلة لفقد طاقة النيوترونات وتبطيئها. أما التشتت غير المرن على النوى المتوسطة والثقيلة فلا يلعب دورا هاما في فقد

طاقة النيوترون إلا بالنسبة للطاقات الكبيرة (أكبر من ميغـــا إلكتـــرون فولت).

3-5-3 التشتت المرن للنيوترونات

The neutron elastic scattering

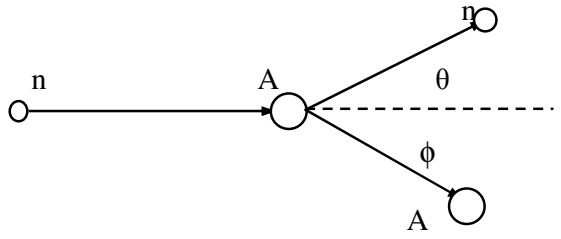
عند سقوط نيوترون طاقته E_0 على نواة عددها الكتلي A ينحرف النيوترون عن مساره ويفقد جزءا من طاقته بفعل القوي النووية. فإذا لم تتغير الطاقة الداخلية للنواة (أي عندما يحدث تغير في طاقتها الحركيـــة فقط) يسمى هذا التشتت بالتشتت المرن أو الاستطارة المرنة شـــكل (3-11).

وباستخدام قانوني بقاء الطاقة والزخم يمكن إيجاد طاقة النيوترون بعد التشتت كالآتي:

$$E = E_0 (A^2 + 2A \cos \phi + 1) / (A + 1)^2 \qquad (3\text{-}40)$$

حيث E هي طاقة النيوترون بعد التشتت، ϕ هي زاويـــة التشـــتت فـــي مجموعة إحداثيات مركز الثقل، وهي مرتبطة بزاويـــة التشـــتت θ فـــي مجموعة الإحداثيات المعملية بالعلاقة التالية:

$$\cos \theta = (1 + A \cos) / (A^2 + 2 A \cos \phi + 1) \qquad (3\text{-}41)$$



شكل (3-11)
التشتت المرن للنيوترونات

وتبين العلاقة (3–40) أن طاقة النيوترون بعد التشتت تكون أقل ما يمكن للمادة نفسها إذا كانت زاوية التشتت $=180^{\circ}$ (أي ارتداد النيوترون للخلف تماما) حيث أن جيب تمام 180 يساوي (–1). عندئذ تصبح طاقة النيوترون بعد التشتت هي:

$$E = E_0 \left(A^2 - 2A + 1 \right) / \left(A + 1 \right)^2 \qquad (3\text{-}42)$$

كذلك، يتضح أنه إذا كانت المادة التي تشتت عليها النيوترونات هي الهيدروجين ($A = 1$) فإنه عند التشتت للخلف تكون طاقة النيوترون E مساوية للصفر. أي أن النيوترون في هذه الحالة يمنح كل طاقته لنواة الهيدروجين ويتوقف.

وهكذا يفقد النيوترون طاقة أكبر بعد التشتت كلما كانت زاوية التشتت كبيرة. وبالنسبة للزاوية المعينة تزداد قيمة الطاقة التي يفقدها النيوترون في التصادم الواحد كلما انخفض العدد الكتلي للنواة التي يحدث التشتت المرن عليها. لذا، تعتبر المواد المكونة من الهيدروجين أو التي تحتوي على نسبة كبيرة منه في تكوينها أفضل المهدئات للنيوترونات (neutron moderators). وهكذا، يمكن أن يفقد النيوترون جزءا كبيرا أو صغيرا من طاقته في التصادم الواحد. ويستخدم في النواحي العملية قيمة أخرى تعرف باسم متوسط لوغاريتم انخفاض الطاقة في التصادم الواحد، أو الانخفاض اللوغاريتمي المتوسط للتصادم الواحد ζ. ويعرف الانخفاض اللوغاريتمي المتوسط كالآتي:

$$\zeta = \ln E_0 - \ln E = \ln \left(\overline{E_0} / E \right) \qquad (3\text{-}43)$$

وبحساب هذه القيمة باستخدام العلاقة (3–40) نجد أن:

$$\zeta = 1 - \left[\left(A-1 \right)^2 / 2A \right] \ln \left[(A+1) / (A-1) \right] \qquad (3\text{-}44)$$

وبالنسبة للهيدروجين حيث $A = 1$ ، نجد أن $\zeta = 1$. وهذا يعني أن طاقة النيوترون تنخفض في المتوسط بعد كل تصادم بمقدار 2.71 مرة (أي مايساوي الأساس اللوغاريتمي الطبيعي). أي أن طاقة النيوترون بعد كل تصادم تصبح في المتوسط مساوية 37% من طاقته قبل التصادم.

وبمعرفة متوسط الانخفاض ζ للمادة يمكن إيجاد متوسط عدد التصادمات اللازمة لتخفيض طاقة النيوترون من القيمة الأصلية للقيمة المطلوبة. فإذا كانت القيمة الأصلية لطاقة النيوترون قبل التصادم هي 2 ميغا إلكترون فولت على سبيل المثال ويلزم تهدئته حتى طاقة مقدارها 0.025 إلكترون فولت (أي طاقة النيوترونات الحرارية) يكون متوسط عدد التصادمات المطلوبة هو:

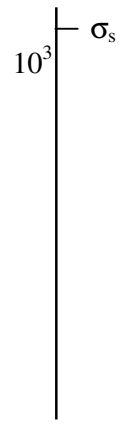
$$N = \ln (E_0 / E) / \zeta$$

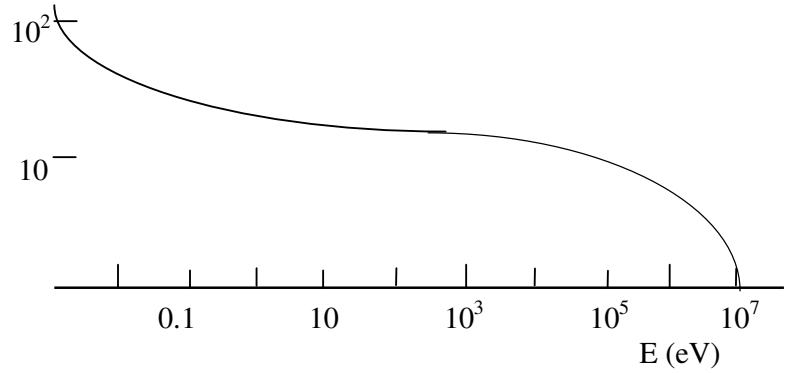
$$= [\ln(2 \times 10^6 / 0.025)] / \zeta$$

أي أنه بالنسبة للهيدروجين يكون متوسط عدد التصادمات المطلوبة هو:

$$N = 18.2 / 1 = 18.2$$

لذلك، يعتبر الهيدروجين من أفضل المهدئات لأن متوسط عدد التصادمات اللازمة لتهدئة النيوترونات السريعة وتحويلها إلى نيوترونات حرارية محدود (حوالي 18- 19 تصادما). ولكن يجب ملاحظة أن احتمال تصادم النيوترون بالهيدروجين الموجود في الحالة الغازية احتمال ضعيف للغاية وذلك لأن عدد ذرات الهيدروجين في وحدة الحجم من الغاز عدد صغير. كما يجب أن يوضع في الحسبان اختلاف قيمة المقطع العرضي σ_s لتشتت النيوترونات باختلاف المادة، وكذلك باختلاف طاقة النيوترونات. ويبين الشكل (3-12) كيفية تغير المقطع العرضي $\sigma\sigma_s$ للتشتت المرن كدالة من طاقة النيوترونات بالنسبة للهيدروجين. وأخيرا فإنه لكي يكون المهدئ من النوع الجيد يجب أن يكون المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات في هذه المادة أصغر ما يمكن حتى لا تتعرض النيوترونات للامتصاص دون التهدئة. وحتى يمكن أخذ جميع هذه العوامل في الحسبان تستخدم كميتان جديدتان لتحديد خصائص المادة المهدئة للنيوترونات وهما:





شكل (3-12)
تغير المقطع العرضي $\sigma\sigma_s$ من طاقة النيوترونات بالنسبة للهيدروجين

أ- القدرة على التهدئة The slowing down power (SDP)

هي عبارة عن حاصل ضرب متوسط لوغاريتم انخفاض الطاقة بالتصادم الواحد للمادة المعينة في عدد ذرات هذه المادة في وحدة الحجوم n في المقطع العرضي للتشتت σ_s لهذه المادة، أي أن:

$$SDP = \zeta\, n\, \sigma_s$$

$$= \zeta\, \sigma_S\, (N_a\, \rho / A)$$

$$= \zeta\, \Sigma_s \qquad (3\text{-}45)$$

حيث N_a عدد أفوغادرو، ρ كثافة المادة، A عددها الكتلي. وتسمى القيمة $\Sigma_s = n\, \sigma_s$ بالمقطع العرضي الجهري للتشتت (أو الاستطارة) (Scattering macroscopic cross - section) وهو عبارة عن احتمال تشتت النيوترون على 1سم^3 من المادة.

ب- نسبة التهدئة The moderating ratio (MR)

هي عبارة عن حاصل قسمة القدرة على التهدئة على المقطع العرضي الجهري للامتصاص، أي أن:

$$MR = \zeta\, n\, \sigma_s / n\, \sigma_a$$
$$= \zeta\, \Sigma_s / \Sigma_a$$
$$= \zeta\, \sigma_s / \sigma_a$$

حيث σ_a هو المقطع العرضي لامتصاص النيوترون داخل هـذه المادة، Σ_a المقطع العرضي الجهري للامتصاص. أي أن نسبة التهدئـة هي عبارة عن نسبة النيوترونات المهدأة إلى النيوترونات الممتصة فـي المادة.

3-5-4 التشتت غير المرن للنيوترونات

The neutron inelastic scattering

عند حدوث تشتت غير مرن للنيوترونات تنتقل النواة التي حـدث عليها التشتت من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة. ولا يحـدث هـذا النوع من التشتت إلا إذا كانت طاقة النيوترون مساوية أو أكبر من قيمة حدية معينة. لذا، فإن التشتت غير المرن لا يحدث إلا للنيوترونات التي تزيد طاقتها على عدة عشرات بل ربما عدة مئات من الكيلو إلكتـرون فولت. وبذلك، لا يلعب التشتت غير المرن دورا مهما في عملية تهدئـة النيوترونات عند الطاقات الصغيرة.

3-5-5 الأسر النيوتروني The neutron capture

يحدث في العديد من العناصر أن تأسر نواة العنصـر نيوترونـا مكونة بذلك نواة نظير جديد. وتتكون هذه النواة الجديدة عادة في الحالة المثارة. وتعتمد قيمة المقطع العرضي للأسر σ_c (capture cross-section) على طاقة النيوترون وتزداد زيادة كبيرة عند قيم معينة للطاقة تختلـف من نواة لأخرى. ويعرف الأسر عند هذه القيم بالأسـر أو الامتصـاص التجاوبي (resonance absorption). وتعود النواة المتكونـة مـن الحالـة المثارة إلى الحالة الأرضية مصدرة بذلك إشعاعات جاما. لذلك، يعـرف أحيانا هذا النوع من الامتصاص بالأسر الإشـعاعي (radiative capture)

أو بالتفاعل نيوترون، جاما (γ , n). ويمكن حساب قيمة المقطع العرضي للأسر التجاوبي σ_c نظريا وقد وجد أنه يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية:

$$\sigma_c = C / [(E-E_r)^2 + b] \qquad (3\text{-}47)$$

حيث C ، b ثوابت تعتمد على نوع النواة وحالتها المثارة، أما E فهي طاقة النيوترون الساقط، E_r هي طاقة النيوترون التي يحدث عندها التجاوب (resonance energy). كذلك وجد أنه بالنسبة للنيوترونات ذات الطاقات الحرارية يتناسب المقطع العرضي للأسر التجاوبي σ_c تناسبا عكسيا مع سرعة هذه النيوترونات v ، أي أن:

$$\sigma_c = 1 / E^{1/2v} = 1 / v \qquad (3\text{-}48)$$

حيث: v هي سرعة النيوترونات. وتجدر الإشارة إلى أن منطقة الطاقات الحرارية تكون سابقة لمنطقة الطاقات التي يحدث عندها الأسر التجاوبي بالنسبة لغالبية العناصر باستثناء عنصر الكادميوم $_{48}Cd$. فبالنسبة لهذا العنصر يحدث الامتصاص التجاوبي بالقرب من الطاقات الحرارية. ويتميز المقطع العرضي للامتصاص التجاوبي σ_c بأن قيمته عالية للغاية. لذلك، يستخدم هذا العنصر كمادة عالية الفعالية لعمل الحواجز الواقية من النيوترونات الحرارية.

وعند الطاقات العالية للنيوترونات يمكن أن تفتح قنوات جديدة للتفاعل. فبعد امتصاص النيوترون يمكن أن تصدر النواة المركبة أحد الجسيمات المشحونة الثقيلة مثل جسيمات ألفا أو البروتونات أو غيرها، وذلك حسب طاقة النيوترونات ونوع النواة. ومن أمثلة هذه التفاعلات بين النيوترونات السريعة والنوى مع إصدار جسيمات مشحونة ثقيلة تفاعل النيوترونات السريعة مع النيتروجين 14 ، الذي يحدث، عادة، في الغلاف الجوي المحيط بالكرة الأرضية والذي يمثل النيتروجين حوالي 80 % من مكوناته.

$$^{14}_{7}N + n \longrightarrow {}^{14}_{6}C + P$$

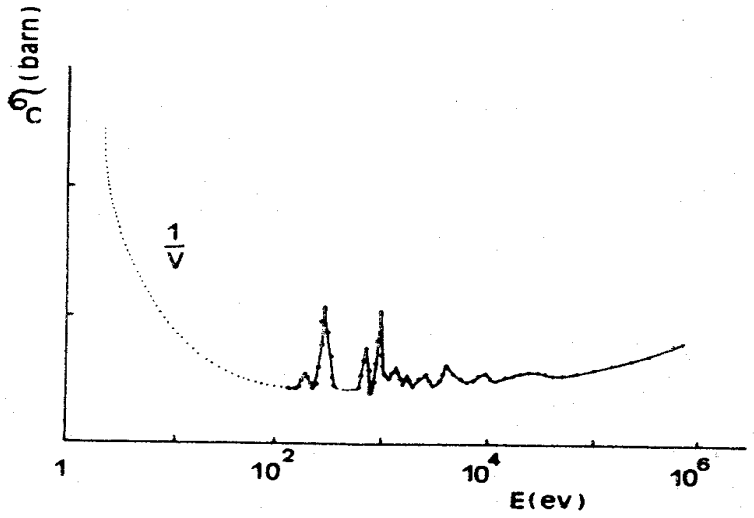
وتجدر الإشارة إلى أن هذا التفاعل يحدث في الغلاف الجوي للكرة الأرضية عندما تصطدم النيوترونات السريعة القادمة من الأشعة

الكونية مع نوى النيتروجين، فيتكون بذلك نظير الكربـــون 14 المشـــع لجسيمات بيتا طبقا لأسلوب التفكك التالي:

$$^{14}_{6}C \quad \text{5568 سنة} \longrightarrow {}^{14}_{7}N + \beta^{-} + \nu\acute{u}$$

وطبقا لقوانين التوازن الإشعاعي (راجع الفصل الثاني) فإنـــه بعد مرور ما يقرب من عشرة أعمار نصـــفية للكربـــون (أي حـــوالي 55680 سنة) من بدء التكوين يحدث التوازن بين التكـــوين والتفكـــك فيصبح عدد ذرات الكربون 14 ثابتا في الجو. وحيث أن الكربـــون 14 يوجد في الجو على شكل غاو ثاني أكسيد الكربون، فـــإن النســـبة بـــين $^{14}_{6}CO_2$ ، $^{12}_{6}CO_2$ تكون ثابتة في الجو، وبالتالي في جميـــع الكائنـــات الحية. وبمجرد موت الكائن الحي فإنه يتوقف عن استهلاك ثاني أكســـيد الكربون من الجو . عندئذ تبدأ نسبة $^{14}_{6}C$ الموجودة فـــي جســـمه فـــي التناقص نتيجة للتفكك الإشعاعي. وتستخدم هذه الحقيقـــة فـــي عمليـــات التأريخ وتحديد أعمار الاكتشافات الأثرية ذات الأصل الحي.

ويوضح شكل (3–13) كيفية تغير المقطع العرضي للامتصاص بزيادة طاقة النيوترون حيث تتضح عليه المنطقـــة ($\sigma_c = 1/v$) للطاقـــات الحرارية ثم منطقة الأسر التجاوبي. وعند الطاقات العالية يزداد المقطع العرضي بسبب فتح قنوات جديدة للتفاعل بين النيوترون والمـــادة مـــع إصدار الجسيمات المشحونة الثقيلة.



شكل (٣ - ١٣)

تغير المقطع العرضي للامتصاص بزيادة طاقة النيوترون

3-5-6 المقطع العرضي الكلي للنيوترونات وتعيينه عمليا

The total neutron cross – section and its determination

المقطع العرضي الكلي σ_t هو عبارة عن مجموع المقاطع العرضية للتشتت المرن والامتصاص، أي أن:

$$\sigma t = \sigma s + \sigma c \qquad (3\text{-}49)$$

وتجدر الإشارة إلى صعوبة التحديد العملي لكل من σ_s، σ_c كل على حدة، في حين أنه يمكن تحديد المقطع العرضي σ_t بسهولة. ويمكن تنفيذ ذلك بوضع سمك معين من المادة المطلوب تعيين المقطع الكلي لها بين مصدر النيوترونات والكاشف النيوتروني (يجب أن تكون حزمة النيوترونات الخارجة من المصدر متوازية) ثم يقاس معدل العد في الكاشف في وجود المادة وبدونها. ومن هاتين القراءتين يمكن تحديد المقطع الكلي للنيوترونات لهذه المادة باستخدام العلاقة المعروفة التالية:

$$N = N_0 e^{-n \sigma t x} = N_0 e^{-\Sigma \mu t x}$$

حيث: N هي معدل العد عند وجود المادة بين الكاشف والمصدر، N_0 هو المعدل بدون المادة، n عدد الذرات في 1 سم^3 من المادة، x هو سمك هذه المادة. وبذلك يمكن اعتبار المقدار $n \sigma_t$ بمثابة معامل الامتصاص الخطي للنيوترونات، أي أن:

$$\mu_t = n \sigma_t$$

3-6 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- اشرح كيف تنتقل الطاقة من جسيم ألفا إلى المادة، وقارن بينها وبين انتقال الطاقة من الإلكترون إلى المادة.

2- عرف المدى والتبعثر للجسيمات الثقيلة وقارنهما بنظيريهما للإلكترونات.

3- ما هو التأين النوعي، وكيف يرتبط بقدرة الإيقاف؟، وما هي القيم التقريبية للتأين النوعي لكل من الجسيمات الثقيلة والإلكترونات وإشعاعات جاما؟

4- عرف قدرة الإيقاف، وما هي العلاقة بينها وبين المدى؟ قارن بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبرتونات.

5- ارسم مسار جسيم بيتا في المادة وعلل ما رسمت.

6- ما هو دور التشتت الارتدادي لجسيمات بيتا؟، وما سببه؟، وكيف يمكن تلافيه؟.

7- كيف تفقد الإلكترونات طاقتها في المادة عند الطاقات المختلفة؟.

8- ما هو قانون الامتصاص للإلكترونات في المادة؟. عرف معامل الامتصاص. وما هي العوامل التي تؤثر في قيمته؟. عرف السمك النصفي. وما هي وحداته؟.

9- كيف تفقد إشعاعات جاما والأشعة السينية طاقاتها في المادة؟.

10- اشرح قانون امتصاص إشعاعات جاما في المادة، وما هي العوامل المؤثرة على معامل الامتصاص الخطي؟.

11- كيف يتأثر معامل الامتصاص لإشعاعات جاما بالعدد الذري لمادة الامتصاص؟، وما هي الصيغ المختلفة لهذا المعامل؟.

12- عرف التأثير الكهروضوئي. كيف يعتمد مقطعه العرضي على العدد الذري للمادة الممتصة وعلى طاقة الإشعاعات؟. وما هي الاتجاهات المفضلة لانطلاق الإلكترون الكهروضوئي؟.

13- عرف تأثير كومبتون. كيف يعتمد مقطعه العرضي على العدد الذري للمادة وعلى طاقة الإشعاعات؟، وما هي الاتجاهات المفضلة لانطلاق إلكترون كومبتون؟.

14- ما معنى إنتاج الأزواج؟، وكيف يعتمد مقطعه على كل من طاقة الإشعاعات ونوع المادة؟.

15- عرف أثر موسباور.

16- اذكر بعض مصادر النيوترونات واشرح أهم الفروق بينها.

17- كيف تفقد النيوترونات طاقها عند السقط على المادة؟.

18- اشرح التشتت المرن للنيوترونات، وكيف يستخدم كمهدئ؟

19- عرف كلا من متوسط انخفاض الطاقة في التصادم الواحد والقدرة على التهدئة، ونسبة التهدئة.

20 ما هي الشروط الواجب توفرها في المادة المستخدمة كمهدئ للنيوترونات؟.

21- عرف التشتت غير المرن للنيوترونات، وما دوره كمهدئ للنيوترونات؟.

22- ما هو الأسر النيوتروني؟، وكيف يعتمد مقطعه العرضي على طاقة النيوترونات؟

23- عرف الامتصاص الكلي للنيوترونات وكيف يمكن تعيين مقطعه عمليا؟.

24- احسب قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا في الألمونيوم إذا كانت العلاقة بين الطاقة والمدى للبروتونات كالتالي:

E_P (MeV)	1	1.5
R_P (gr/cm^2)	0.00343	0.0069

(الجواب 580 ميغا إلكترون فولت/غم سم^2)

25- عند دراسة امتصاص جسيمات بيتا الصادرة من نظير الفسفور 32 في مادة الألمونيوم كانت النتائج كالمبينة في الجدول. عين

سمك	صفر	100	200	300	400	500	600	700	800	900

الألمونيوم (ملجم/سم^2)										
معدل العد	1000	600	375	165	65	18	5.5	5	4	4

من هذه البيانات مدى الجسيمات في الألمونيوم والسمك النصفي.

26- من المعروف أن كل جرام من الفحم الخشبي المتكون حديثا يحدث 16.1 تفكك بيتا في الدقيقة نتيجة لوجود الكربون 14 بنسبته الثابتة. وبالكشف عن قطعة أثرية من الخشب كان معدل العد في الكاشف 7 تفككات في الدقيقة لكل 20 جرام من هذا الخشب الأثري. عين عمر هذه القطعة الأثرية، علما بأن العمر النصفي للكربون 14 هو 5570 سنة.

27- عند دراسة توهين إشعاعات جاما الصادرة من نظير الصوديوم 24 (طاقة 2.76 م إف) في كل من $_{13}Al$ ، $_{50}Ti$ ، $_{82}Pb$ كانت النتائج كالمبينة في الجدول التالي:

$_{13}Al$		$_{50}Ti$		$_{82}Pb$	
معدل العد	السمك(سم)	معدل العد	السمك(سم)	معدل العد	السمك(سم)
1000	صفر	1000	صفر	1000	صفر
788	2.5	923	1	620	1
622	5.0	586	2	384	2
420	7.5	449	3	238	3
387	10.0	263	5	147	4
305	12.5	154	7	57	6
240	15.0	69	10	8	10
50	20.0	14	16		
58	30.0				
22	40.0				

أوجد من هذه النتائج معامل التوهين μ (سم$^{-1}$) بيانيا. وأوجد السمك النصفي لكل مادة.

الفصل الرابع

كواشف الإشعاعات النووية
Nuclear radiation detectors

– مقدمة – حركة الإلكترونات والأيونات في الغازات – التيار الإلكتروني والأيوني في الغازات – الكواشف الغازية – غرفة الانتشار التناسبية – عدادات غايغر ميولر – الغرفة السحابية – غرفة الانتشار – الغرفة الفقاعية – الكواشف الوميضية – الكواشف شبه الموصلة – العداد الشراري – كواشف نشيرنكوف – ألواح وأفلام التصوير – أسئلة ومسائل

4-1 مقدمة

تتطلب جميع القياسات النووية (سواء في مختبرات البحوث أو محطات القوى النووية أو القياسات الخاصة بالوقاية من أخطار الإشعاعات المؤينة أو غيرها) توفر الأجهزة الخاصة بالكشف عن الأنواع المختلفة من الإشعاعات النووية وتسجيلها. وتعرف هذه الأجهزة بكواشف (مكاشيف) الإشعاعات (Radiation detectors). وتستخدم هذه الكواشف، عموما، لتحديد نوع الإشعاعات وقياس كمياتها وتحديد طاقتها.

ويتوقف نوع الكاشف المستخدم على عدة عوامل أهمها:

أ- نوع الجسيمات أو الإشعاعات المطلوب الكشف عنها (جسيمات مشحونة ثقيلة أو الإلكترونات أو أشعة سينية أو إشعاعات جاما أو نيوترونات).
ب- طاقة هذه الإشعاعات.

ج- شدة الإشعاعات أو كثافة تدفقها.
د- طبيعة المكان الذي سيوضع فيه الكاشف المعين.

ويقوم مبدأ الكشف عن الإشعاعات في كثير من الكواشف على استخدام ظاهرة تأين أو إثارة الإشعاعات لذرات أو جزيئات المادة عند المرور فيها. فعند مرور الإشعاعات في مادة ما يمكن إيجاد عدد الأزواج الإلكترونية – الأيونية المتكونة نتيجة للتأيين (راجع الفصل الثالث). وقد لوحظ أن القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد $\overline{W}$ لا تعتمد على نوع الإشعاعات أو طاقتها وإنما تعتمد على نوع المادة، وأن هذه القيمة حوالي 35 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية. لذا، فإنه عند مرور بروتون طاقته 1ميغا إلكترون فولت في هذا الهواء فإنه ينتج في هذا الهواء عددا من الأزواج مقداره:

$$1\ MeV = 10^6\ eV \div 35 = 2.86 \times 10^4 \quad \text{electron ion pairs}$$

وذلك على طول مدى هذا البروتون. ولما كانت شحنة الإلكترون أو الأيون هي 1.6×10^{-19} كولوم، فإن الشحنة الناتجة عن هذا البروتون في الهواء هي: $2.86 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-19} = 4.58 \times 10^{-15}$ كولوم. ويمكن قياس مثل هذه الشحنة بسهولة.

وأما بالنسبة للأشعة السينية وإشعاعات جاما والجسيمات المتعادلة الشحنة كالنيوترونات فهي لا تؤين المادة عند المرور فيها بطريقة مباشرة ولكنها تؤينها بطريقة غير مباشرة. فالنيوترونات يمكن أن تتفاعل مع المادة ويؤدي هذا التفاعل إلى انطلاق جسيم مشحون (بروتون أو جسيم ألفا) يعرف بالجسيم الثانوي الناتج أو النواة المرتدة (recoil nucleus) . ويحمل هذا الجسيم أو النواة جزءا كبيرا من طاقة النيوترون الساقط فيقوم بالتالي بتأين المادة وتكوين الأزواج الإلكترونية – الأيونية.

وفي حالة إشعاعات جاما أو الأشعة السينية تقوم الإلكترونات الثانوية الناتجة عن التأثير الكهروضوئي أو تأثير كومبتون أو إنتاج الأزواج بعملية تأين المادة وتكوين الأزواج الإلكترونية الأيونية فيها.

لذلك، تنتمي جميع الجسيمات المشحونة الثقيلة كجسيمات ألفا والبروتونات والديوترونات والأيونات وشظايا الانشطار النووي والنوى المرتدة والجسيمات المشحونة كالإلكترونات والبوزيترونات وغيرها والأشعة السينية وإشعاعات جاما إلى مايعرف باسم الإشعاعات المؤينة.

وهناك أنواع أخرى من الكواشف تعتمد في عملها على حدوث بعض التغيرات الكيميائية في مادتها. وبقياس هذه التغيرات الناتجة يمكن الكشف عن كمية الإشعاعات. وتتميز مثل هذه الأنواع من الكواشف بحساسية ضعيفة. لذلك، فإنها لا تستخدم إلا في المجالات الإشعاعية شديدة الكثافة مثل كواشف قياس جرعات تشعيع المنتجات المعالجة بالإشعاع والأغذية. وهناك أنواع أخرى من كواشف النيوترونات تقوم على أساس قياس النشاط الإشعاعي للمادة بعد مرور النيوترونات فيها. فمن المعروف أنه عند مرور النيوترونات في المادة يمتص منها جزء في نوي ذرات المادة، فتتحول بعض هذه الذرات إلى نظائر مشعة. وبقياس النشاط الإشعاعي لهذه النظائر المستحثة يمكن معرفة كثافة النيوترونات الساقطة.

4-2 حركة الإلكترونات والأيونات في الغازات
Motion of electrons and ions in gasses

عند مرور الإشعاعات المؤينة في الغاز تتكون أزواج إلكترونية – أيونية. وتكون كل من الإلكترونات والأيونات حرة الحركة. ونتيجة لهذه الحركة تتصادم كل من الإلكترونات والأيونات مع ذرات أو جزيئات الغاز الذي تتحرك فيه. ويتناسب متوسط المسار الحر للإلكترونات أو الأيونات في الغاز المعين تناسبا عكسيا مع عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجوم (متوسط المسار الحر هو عبارة عن متوسط المسافة التي يتحركها الجسيم دون تصادم). ويبلغ متوسط المسار الحر في الظروف المعيارية للضغط والحرارة حوالي $10^{-5} - 10^{-4}$ سم بالنسبة لمعظم الغازات (الظروف المعيارية للضغط هي 760 مم زئبق وللحرارة هي 20° م). وعموما، يكون اتجاه حركة الإلكترونات والأيونات المتحركة عشوائيا، طالما لا تخضع لتأثير مجال كهربائي.

4-2-1 الحركة الانسياقية The drift motion

عند وجود الإلكترونات والأيونات المتكونة في الغاز تحت تأثير مجال كهربائي شدته E تتحرك هذه الإلكترونات والأيونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال، في نفس اتجاه المجال بالنسبة للأيونات الموجبة وفي اتجاه معاكس لاتجاهه بالنسبة للإلكترونات. ويقصد بالحركة الانسياقية أن الجسيم المشحون (سوء الإلكترون أو الأيون) يبدأ تحركه بتسارع تحت تأثير المجال الكهربائي لكنه سرعان ما يصطدم بذرات الغاز الموجودة في الحيز فيفقد كل طاقته التي اكتسبها أو جزءا منها، ثم يبدأ في التسارع من جديد ... وهكذا. ويمكن تحديد السرعة المتوسطة للحركة الانسياقية من العلاقة:

$$v = \mu (E / P) \qquad (4\text{-}1)$$

حيث v سرعة الحركة الانسياقية ، E شدة المجال الكهربائي، P ضغط الغاز . ويعرف المعامل μ بمعامل الحركية mobility (أي القدرة على الحركة)، وهو يتوقف على نوع الغاز كما يعتمد على كل من شدة المجال الكهربائي المؤثر E والضغط P . ويكون مقدار μ صغير عندما يكون مقدار E/P صغير، إلا أن μ يصبح ثابتا عندما يصبح مقدار E/P كبيرا . وتصل السرعة الانسياقية للإلكترونات في الغاز إلى ما يقرب من $10^{6} - 10^{7}$ سم/ثانية عندما تكون E/P في حدود 10 فولت/سم. x مم زئبق .

4—2-2 الالتصاق The attachment

هناك ظاهرة أخرى تحدث أثناء حركة الإلكترونات والأيونات في الغاز. فعند تصادم الإلكترون الحر مع جزئ متعادل (أو ذرة) من جزيئات الغاز (أو ذرات) يمكن أن يلتصق هذا الإلكترون مع الجزيء (أو الذرة) المتعادل، ويتكون بالتالي جزيء سالب. وتعرف هذه الظاهرة باسم الالتصاق.

ويعرف معامل الالتصاق h بأنه عبارة عن احتمال حدوث الالتصاق عند تصادم إلكترون واحد بجزيء متعادل. ويعتمد هذا

المعامل على نوع الغاز، وتصل قيمته بالنسبة للأكسجين وبخار الماء والغازات الهالوجينية الأخرى حوالي 10^{-3} وهي قيمة كبيرة. ويؤدي الالتصاق إلى فقد الإلكترونات الحرة من مجموعة الإلكترونات الناتجة عن التأيين. لذلك، فإنه يجب مقاومته حتى لا يفقد جزء كبير من هذه الإلكترونات. لهذا السبب يجب عدم استخدام الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء في بعض أنواع الكواشف الغازية.

4-2-3 إعادة الالتحام The recombination

عند وجود إلكترون سالب وأيون موجب بالقرب من بعضهما البعض فإنهما يمكن أن يعيدا التحامهما، مكونين بذلك ذرة أو جزيئا متعادلا. وتعرف هذه الظاهرة باسم إعادة الالتحام (recombination) . ويتناسب معدل إعادة الالتحام (أي عدد مرات إعادة الالتحام في وحدة الحجوم وفي وحدة الزمن) تناسبا طرديا مع تركيز كل من الإلكترونات n_- والأيونات n_+ ويمكن تحديده من العلاقة:

$$dn_+/dt = dn_-/dt = -\alpha n_+ n \qquad (4\text{-}2)$$

حيث α معامل ثابت يعرف باسم معامل إعادة الالتحام، ويتراوح مقداره للهواء بين 10^{-7} ، 10^{-10} ، وذلك عندما تكون الشحنات السالبة والموجبة موزعة توزعا متجانسا في الحيز الذي تشغله. أما إذا كانت الشحنات مركزة في منطقة ما (كما يحدث عند تكون الأزواج الإلكترونية الأيونية على طول أثر(مسار) الجسيم المشحون يزداد معامل إعادة الالتحام زيادة واضحة.

وتجدر الإشارة إلى أن حركية الإلكترونات أكبر بكثير من حركية الأيونات. كذلك، فإن حركية الإلكترونات، لا تؤدي إلى حدوث تغير ملموس في ضغط الغاز أو في شدة المجال الكهربائي.

4-3 التيار الإلكتروني والأيوني في الغازات
The electron and ion currents in gasses

يمثل انتقال الإلكترونات والأيونات في الغـــاز انتقـــالا للشـــحنة الكهربائية. وهذا بدوره هو بمثابة مرور تيار كهربي شـــدته I يمكـــن تحديده من العلاقة التالية:

$$I = I_+ + I_- \qquad (4\text{-}3)$$

حيث: I_+ ، I_- ، هما عبارة عن شدة التيار الأيوني والإلكتروني على الترتيب.

وعموما، يمكن أن يمر تيار كهربائي في الغاز حتى فـــي حالـــة عدم وجود مجال كهربائي، وذلك بسبب ظاهرة الانتشـــار (diffusion) ، حيث تنتشر كل من الإلكترونات والأيونات من الوسط الأكثر تركيزا إلى الوسط الأقل تركيزا. ويتكون نتيجة لهذا الانتشار تيار كهربـــائي شـــدته للأيونات هي:

$$I_{D+} = - e D_+ (dn_+/dx) \qquad (4\text{-}4)$$

وشدته للإلكترونات هي:

$$I_{D-} = - e D_- (dn_-/dx) \qquad (4\text{-}5)$$

حيث: D_+ ، D_- معامـــل الانتشـــار للأيونـــات وللإلكترونـــات بالترتيب. أما (dn_+/dx) فهو معدل تغير تركيز الأيونات بتغير المسافة، (dn_-/dx) فهو معدل تغير تركيز الإلكترونات بتغير هذه المسافة. بتغير المسافة .

أما في حالة وجود مجال كهربائي شدته E فإنـــه إلـــى جانـــب الحركة الانتشارية تتحرك كل من الأيونات والإلكترونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال بالإضافة إلى تلك الحركة الانتشارية. وينتج عن هذه الحركة الانسياقية مرور تيار كهربائي شدته لوحدة المساحات (أي كثافته) للأيونات هي:

$$I_{E+} = e n_+ v_+ \qquad (4\text{-}6)$$

وللإلكترونات هي:

$$I_{E-} = - e n_- v_- \qquad (4\text{-}7)$$

حيث v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

بذلك، يمكن إيجاد شدة التيار الكلي الناتج عن كل من الانتشار والمجال الكهربائي لكل من الإلكترونات والأيونات، وذلك بجمع مركباته الأربعة المختلفة (من 4–4 حتى 4–7)، أي أن:

$$I = e (n_+ v_+ + n_- v_- - D_+ (dn_+/dx) + D_- (dn_-/dx) \qquad (4\text{-}8)$$

4–4 الكواشف الغازية The gas detectors

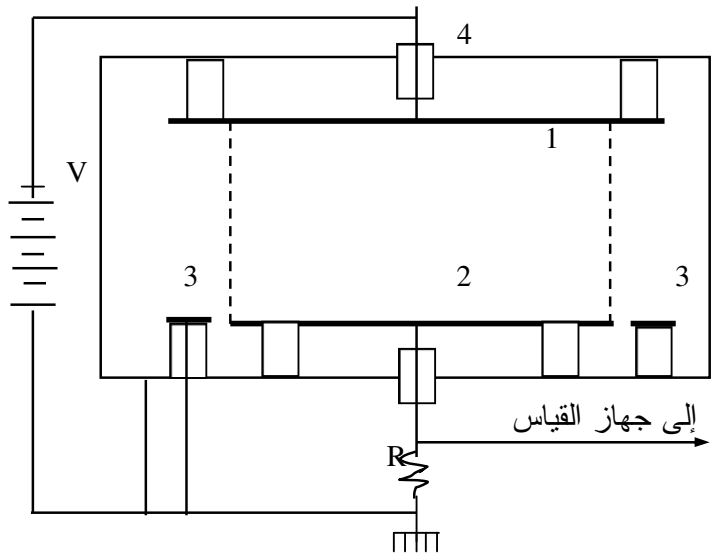
يقوم مبدأ عمل الكواشف الغازية على تجميع الشحنات الكهربائية (الإلكترونية والأيونية) الناتجة عن تأين ذرات أو جزيئات الغاز عند مرور الإشعاعات المؤينة فيه. وبقياس الشحنة الكهربائية الناتجة أو التيار الناتج عنها يمكن الكشف عن مرور الإشعاعات في الغاز. وتنقسم الكواشف الغازية إلى ثلاثة أنواع رئيسة هي:

- غرفة التأين
- العدادات التناسبية
- عدادات غايغر – ميولر.

4–4–1 غرفة التأين The ionization chamber

هي عبارة عن كاشف غازي (gas detector) للإشعاعات المؤينة. ويقوم عملها على تجميع الأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن هذه الإشعاعات في شكل تيار كهربي وقياس هذا التيار أو جهد النبضات الناتجة عنه. وتتكون غرفة التأين عموما من قطبين فلزيين موصلين بطرفي منبع جهد عال. وقد يتخذ القطبان أشكالا مختلفة، ولكن في معظم الأحيان يكون القطبان على شكل ألواح مستوية. ويوضع القطبان داخل إناء مفرغ من الهواء الجوي ويملأ بالغاز المطلوب حتى ضغط معين. ويتوقف ضغط الغاز والأبعاد الهندسية للقطبين عموما على نوع الجسيمات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقاتها. ويستخدم في بعض غرف التأين الهواء الجوي العادي. ويبين شكل (4–1) رسما تخطيطيا

لغرفة تأين ذات قطبين مستويين، موصلة بمنبع الجهد العالي اللازم لتغذية أقطابها. ويعرف القطب المتصل بجهاز قياس التيار بالمجمع أو المصعد أو الأنود (The anode). ويختلف الجهد الواقع على هذا القطب باختلاف التيار المار فيه. أما القطب الآخر فيقع عادة تحت تأثير جهد عال (جهد المنبع) ويعرف بقطب الجهد العالي. يثبت القطبان باستخدام مواد عازلة كهربيا في الإناء الخارجي للغرفة. ويستخدم في العديد من غرف التأين حلقتان تعرفان بالحلقتين الحارستين (guard rings). ويمكن تحقيق الحلقتين الحارستين بفصل الجزأين الطرفيين من القطب المجمع عن القطب نفسه، بحيث لا تكون المسافة الفاصلة كبيرة. ويجب أن يكون جهد الحلقة الحارسة القريبة من المجمع قريبا من جهد القطب المجمع. والغرض من هاتين الحلقتين الحارستين هو تشكيل المجال الكهربي بالقرب من أطراف القطب المجمع، بحيث تكون خطوط قوى المجال الكهربي بين قطب الجهد العالي والقطب المجمع عند الطرفين خطوطا مستقيمة وموازية للخطوط التي في الوسط. ويؤدي ذلك إلى تحديد حجم الغرفة التي تجمع منها الشحنات الكهربية تحديدا دقيقا



شكل (4–1): رسم تخطيطي لغرفة تأين ذي قطبين مستويين

1- قطب الجهد العالي　　2- المجمع (الأنود)
3- حلقة حراسة　　4- عازل

ويعرف هذا الحجم (والمبين في الشكل 4-1 بين الخطين المتقطعين) بالحجم الفعال أو الحجم الحساس للغرفة.

وعند مرور الإشعاعات بين قطبي الغرفة تؤدي هذه الإشعاعات إلى تأيين الغاز ويتم تجميع الشحنات الكهربائية الناتجة عن التأيين داخل الحجم الفعال على المجمع (حيث أن الأيونات والإلكترونات المتكونة خارج هذا الحجم تتجمع على الحلقات الحارسة وتمر مباشرة إلى الأرض). وعند إهمال الانتشار وإعادة الالتحام يكون التيار الناتج عن تجميع الشحنات من الحجم الفعال على المجمع هو:

$$I_S = e \int N_0(\tau)\, dt \qquad (4\text{-}9)$$

حيث $N_0(\tau)$ هو عدد الأزواج الناتجة في وحدة الحجم في الثانية الواحدة. ويؤخذ التكامل بالنسبة للحجم الفعال كله. وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_0(\tau)$ ثابتا بالنسبة للزمن (أي أن عدد الجسيمات التي تدخل الغرفة ثابتا بالنسبة للزمن). وتعني هذه العلاقة أن الشحنات التي تتكون نتيجة التأين في الحجم الفعال يتم تجميعها بالكامل على المجمع ويعرف التيار في هذه الحالة باسم تيار التشبع I_S (saturation current).

ويمكن إهمال كل من تيار الانتشار وإعادة الالتحام عندما تكون شدة المجال بين الأقطاب (أي فرق الجهد بينها) كبيرة . عندئذ تصبح المعادلة (4-9) صحيحة. أما إذا كان فرق الجهد صغيرا أو كان الغاز المستخدم من الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء فإن إعادة الالتحام تلعب دورا مهما وخصوصا بالنسبة للغازات الهالوجينية. لذلك، فإنه يجب أن يوضع التيار المفقود نتيجة لإعادة الالتحام أو نتيجة للالتصاق في الاعتبار. وبالنسبة لغرف التأين ذات الأقطاب المستوية فإنه يمكن حساب التيار المفقود $(\Delta I_s)_r$ بسبب إعادة الالتحام من العلاقة التالية:

$$(\Delta I_s)_r = - I_S (\alpha N_0 (\tau) d^2) / \sigma v_+ v_- \qquad (4\text{-}10)$$

حيث I_S هو تيار التشبع، d هي المسافة بين القطبين و v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

أما بالنسبة للانتشار فيمكن أن يؤدي إلى فقد نسبة أخرى من التيار وذلك لأن الانتشار يمكن أن يحدث في أي اتجاه. ويمكن تحديد قيمة الجزء المفقود $(\Delta I_S)_{dif}$ بسبب الانتشار من العلاقة:

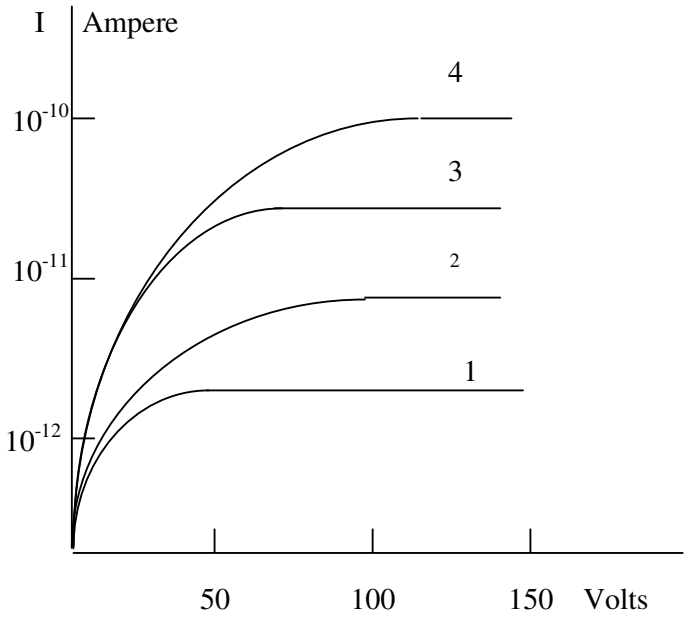
$$(\Delta I_S)_{dif} = - I_s (\varepsilon K T / e V) \qquad (4\text{-}11)$$

حيث: K ثابت بلتسمان، T درجة الحرارة المطلقة، V فرق الجهد بين القطبين، εε عبارة عن النسب بين الطاقة المتوسطة للأيونات في حالة وجود المجال وبدونه. ويوضح شكل (4–2) العلاقة بيت التيار المتجمع I وفرق الجهد V بين القطبين. وتعرف هذه العلاقة باسم المميزة الفولت – أمبيرية لغرفة التأين. ويعتمد شكل هذه المميزة على الأبعاد الهندسية للغرفة وعلى نوع الغاز المستخدم وضغطه ونوع الإشعاعات المارة في الغرفة وشدتها (أي كثافتها). ويتضح تأثير هذه العوامل من شكل (4–2) الخاص بغرفة تأين أسطوانية الشكل والذي يوضح المميزة الفولت أمبيرية لنوعين من الغاز عند شدتين مختلفتين لإشعاعات جاما. وفي حالة البروتونات والجسيمات المشحونة الثقيلة تلعب إعادة الالتحام دورا أكثر لأن التأين النوعي لهذه الجسيمات كبير للغاية، وبالتالي لا يحدث التشبع إلا عند جهود أعلى.

4–4–2 خصائص غرفة التأين

تستخدم جميع غرف التأين عند قيم الجهود التي تحقق تيار التشبع وهو ما يعرف بالعتبة(plateau). ونظرا لبساطتها وسهولة تشغيلها فإنه يمكن تصميم غرف بأشكال وأحجام مختلفة واستخدامها لقياس جميع أنواع الإشعاعات، بما في ذلك إشعاعات جاما والنيوترونات. وعموما يمكن استخدام غرف التأين لقياس القيمة المتوسطة للتيار الناتج عن عدد من الجسيمات أو لقياس نبضة التيار (أو الجهد) الناتج عن مرور جسيم واحد. ويعرف هذا النظام الأخير لتشغيل غرفة التأين بالنظام النبضي،

وهو غالبا ما يستخدم في قياس الشدة الإشعاعية الضعيفة أو عند قيـــاس طاقة الجسيمات أو الإشعاعات. وعموما، يمكن استخدام غازات مختلفة



شكل (4-2): المميزة الفولت أمبيرية لغرفة التأين

1- هليوم وكثافة إشعاعات صغيرة 2- هواء وكثافة صغيرة

3- هليوم وكثافة إشعاعات كبيرة 4- هواء وكثافة كبيرة

داخل الغرفة. لكن بالنسبة للغرف النبضية يفضـــل اســـتخدام الغـــازات الخاملة تحت ضغوط معينة، وذلك لضمان تجميع الإلكترونات وتكـــوين النبضة بسرعة وفي أقصر زمن ممكن، وذلك حتى تتم عملية التســـجيل خلال زمن قصير وتصبح الغرفة جاهزة لاستقبال جسيم آخر وتسجيله.

وعند تصميم غرفة التأين للأغراض المختلفة يجب توجيه عناية خاصة إلى نوعية العازلات المستخدمة لعزل الأقطاب عن بعضها وعن جسم الغرفة وخاصة العازل المستخدم لتثبيت وعزل المجمع. فيجب أن

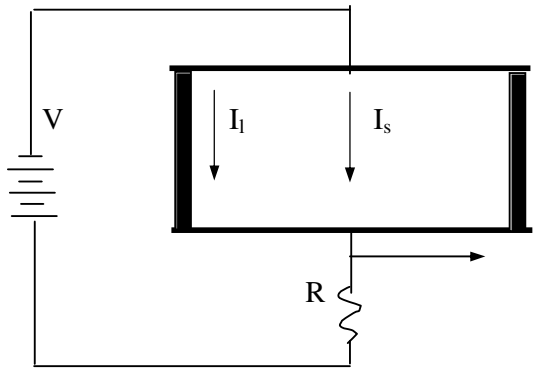
تكون مادة العازل ذات مقاومة عالية جدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن التيار الناتج عن مرور الجسيم يكون صغيرا للغاية. فإذا كانت مقاومة العازل بين القطبين غير كافية فإنه يمكن أن يتسرب بين القطبين تيار يعرف باسم تيار التسرب (leakage current) قيمته هي:

$$I_l = V / R_c$$

حيث: V جهد المنبع، R_C مقاومة العازل (شكل 4-3). فإذا كانت مقاومة العازل في حدود 10^{13} أوم وفرق الجهد بين القطبين 100 فولت يمر تيار تسرب I_l في العازل مقداره:

$$I_l = 100 / 10^{13} = 10 \quad \text{pico-Ampere}$$

وهذا تيار كبير جدا بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي I_s. لذلك، يجب أن يكون العازل المستخدم ذا مقاومة عالية، بحيث لا تقل عن $10^{16} - 10^{17}$ أوم.



شكل (4-3)
تيار التسرب I_l في غرفة التأين

ويمكن أن يزداد تيار التسرب حتى مع استخدام عازل ذي مقاومة عالية وذلك خلال سطح العازل بسبب امتصاص السطح لبخار الماء أو لأي شوائب أخرى. لذا ،يجب المحافظة على سطح العازل نظيفا وجافا وخاليا تماما من أية خدوش مهما كانت صغيرة.

كذلك، تلعب الحلقات الحارسة دورا آخر بالإضافة إلى دورها الرئيسي (وهو تشكيل خطوط القوى لتحديد الحجم الفعال). فهذه الحلقات تمنع الإلكترونات والأيونات التي تتكون على جانبي الحجم الفعال من التجمع على العازل حتى لا تؤثر هذه الشحنات على شكل المجال في الحجم الفعال وحتى لا تؤدي إلى زيادة تيار التسرب.

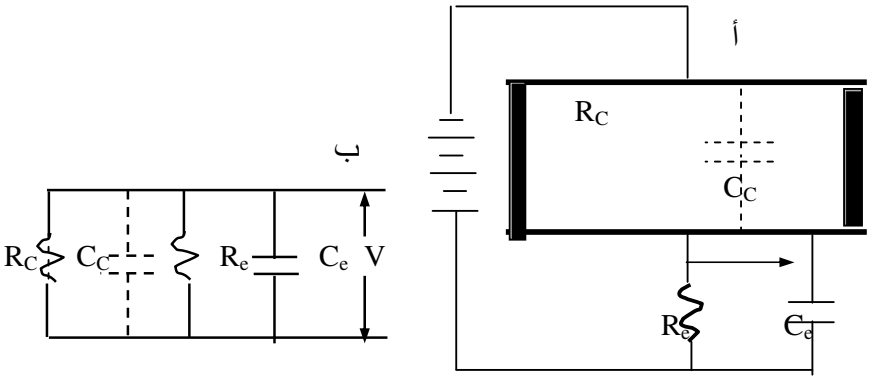
4-4-3 منحنى الاستجابة الديناميكي لغرفة التأين

يمكن النظر إلى أي غرفة تأين من الناحية الإلكترونية على أنها عبارة عن مقاومة R_C (مقاومة العازل بين القطبين). ولما كان القطبان يشكلان سطحين متوازيين فإنه يمكن اعتبارهما مكثفا سعته C_C (كالمبين على شكل 4-4أ بالخط المتقطع). وهكذا، تتميز أية غرفة تأين بمقاومة داخلية R_C وسعة ذاتية C_C. كذلك، فإن الجهاز المستخدم لقياس التيار يحتوي في مدخله على مقاومة داخلية R_e وسعة C_e شكل(4-4أ). وجميع هذه العناصر متصلة مع بعضها على التوازي (شكل 4-4ب). لذا يمكن اعتبار أن السعة الكلية C للغرفة وجهاز القياس هي:

$$C = C_C + C_e$$

والمقاومة الكلية لهما هي:

$$R = R_C R_e / (R_C + R_e)$$



شكل (4-4)
الدارة المستخدمة لقياس التيار الناتج من غرفة التأين

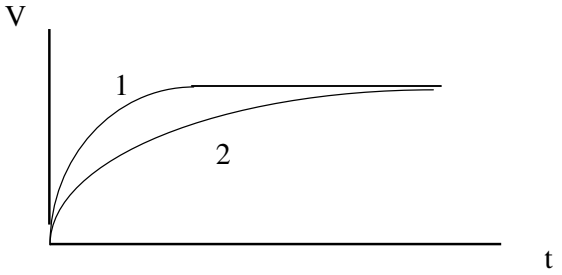
لذلك، ينتج عن تيار الغرفة فرق جهد v على مدخل الجهاز يمكن تحديده من قانون كيرشوف كالآتي:

$$RI = V + RC\,(dv/dt) \qquad (4\text{-}12)$$

وبحل هذه المعادلة التفاضلية يمكن إيجاد كيفية تغير الجهد على مدخل الجهاز كدالة من الزمن حيث نجد أن الجهد V عبارة عن:

$$V = RI\,(1 - e^{-t/RC}) \qquad (4\text{-}13)$$

وتعرف الكمية RC بثابت الزمن للدارة. وكلما كان هذا الثابت RC صغيرا وصل الجهد إلى قيمة التشبع بسرعة (المنحنى1 شكل4-5). أما عند زيادة قيمة RC يصل الجهد إلى قيمة التشبع بعد زمن أكبر(المنحنى2 على نفس الشكل).



شكل (4-5)
منحنى الاستجابة الديناميكي لغرفة التأين

4-4-4 استخدام غرف التأين للكشف عن الإشعاعات المختلفة

يمكن تصميم غرف تأين للكشف عن الأنواع المختلفة من الإشعاعات المؤينة. ويتوقف حجم الغرفة ومواصفاتها وضغط الغاز

بداخلها على نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقة هذه الإشعاعات. لذا، فإنه يمكن تقسيم غرف التأين من حيث نوع الإشعاعات إلى الآتي:

أ- غرف التأين لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

حيث أن القدرة الاختراقية لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى صغيرة، فإن هذه الجسيمات تمتص بالكامل في جدار الغرفة ولا تمر إلى داخلها. لذلك، فإنه يجب عمل نافذة رقيقة في جدار الغرفة تسمح بدخول هذه الجسيمات من خلالها. وتصنع النافذة عموما من مادة خفيفة كالبريليوم أو المواد العضوية الخفيفة، وتكون في شكل غشاء رقيق جدا (أقل من 1 ميللي غرام/سم^2) حتى لا يمتص الغشاء جزءا كبيرا من طاقة الجسيمات، على أن يتحمل هذا الغشاء فرق الضغط الواقع عليه والناتج عن اختلاف ضغط الغاز داخل الغرفة والضغط الجوي خارجها.

ويستخدم هذا النوع من الغرف للكشف عن جسيمات ألفا، خاصة الناتجة عن تلوث أسطح الأجهزة والمعدات بالمواد المصدرة لجسيمات ألفا. وتتميز هذه الغرف بحساسيتها حيث يمكنها الكشف عن التلوث الضعيف الذي لا يزيد نشاطه الإشعاعي على جسيم واحد في الدقيقة.

مثال:

غرفة تأين غازية تدريجها الأصغر يتراوح بين صفر، 500 جسيم/الدقيقة. فإذا علمت أن نافذتها تمتص 20 % من طاقات جسيمات ألفا وإذا كانت طاقة هذه الجسيمات 5 ميغا إلكترون فولت، أحسب مقدار التيار الناتج عنها عندما يكون المؤشر في منتصف التدريج.

الحل:

عندا يكون المؤشر في منتصف التدريج يكون عدد جسيمات ألفا هو 500 ÷ 2 = 250 جسيما في الدقيقة.

مقدار الطاقة المفقودة في النافذة من كل جسيم هو:

$\Delta E = 5 \times 20 / 100 = 1 \quad MeV$

.: مقدار الطاقة المفقودة في تأيين الغاز لكل جسيم هو:

$E_1 = 5 - 1 = 4 \quad MeV$

.: مقدار شدة التيار I الناتج هو عبارة عن الشحنة المتولدة مقسومة على زمن تولدها (1 دقيقة = 60 ثانية، أي أن:

$I = dQ / dt$

$= 250 \times 4x10^{6} \times 1.6x10^{-19} / 35 \times 60$

$= 7.6 \times 10^{-14} \quad Ampere \quad = 7.6 \times 10^{-2} \quad picoAmpere$

ب- غرف التأين لجسيمات بيتا

من المعروف أن قدرة جسيمات بيتا على الاختراق كبيرة حيث يصل مداها في الهواء الجوي إلى عدة أمتار، (حوالي 5 متر) عندما يغطي طيفها مدي طاقة يبدأ من الصفر وحتى حوالي 1 ميغا إلكترون فولت. لذلك، فإن ضغط الغاز داخل الغرفة يجب أن يكون كبيرا حتى تتوقف هذه الجسيمات بالكامل داخل الغرفة. وللسبب نفسه فإنه تستخدم نوافذ ذات سمك أكبر لتتحمل فرق الضغط داخل الغرفة وخارجها.

ج- غرف التأين لإشعاعات جاما

نظرا للقدرة الاختراقية الفائقة لإشعاعات جاما فإنه لا يلزم وجود نافذة لغرف التأين الخاصة بالكشف عن هذه الإشعاعات. ونظرا لصغر احتمال حدوث كل من التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون أو إنتاج الأزواج داخل الغاز فإن السطح الداخلي للغرفة يبطن بطبقة رقيقة من الرصاص (لكبر عدده الذري)، وذلك ليزيد من احتمال حدوث أي من هذه العمليات الثلاثة في الرصاص وانطلاق الإلكترون إلى داخل الغاز للقيام بالتأيين. إلا أن سمك هذه الطبقة يجب أن يكون صغيرا وإلا امتصت الإلكترونات المنبعثة من العمليات الثلاثة فيه. وجدير بالذكر أن جزءا قليلا من إشعاعات جاما هو الذي يؤدي إلى انطلاق هذه

الإلكترونات. أما الجزء الآخر فيمر من الغرفة دون أن يترك أي أثر ولا يسجل فيها. لذلك، تتميز جميع أنواع كواشف إشعاعات جاما بمعامل مهم يعرف باسم الكفاءة الذاتية للكاشف.

الكفاءة الذاتية للكاشف The detector intrinsic efficiency

هي عبارة عن نسبة عدد الإشعاعات المسجلة في الكاشف إلى العدد الكلي للإشعاعات الساقطة عليه. وتتناسب كفاءة غرفة التأين الخاصة بالكشف عن إشعاعات جاما تناسبا عكسيا مع طاقة هذه الإشعاعات. كذلك، تتوقف كفاءة الكاشف على حجم الغرفة وعلى نوع الغاز المستخدم فيها وضغطه، وعلى نوع المادة المبطنة للغرفة.

وتتراوح الكفاءة الذاتية لغرف التأين لإشعاعات جاما بين عدة أجزاء من مائة ألف إلى عدة أجزاء من المائة.

د- غرف التأين للنيوترونات

عند مرور النيوترونات في المادة فإنه لا ينتج عنها أي تأين. لذا فإنه من الضروري إيجاد وسيلة لتوليد الجسيمات المشحونة بفعل النيوترونات، حيث تؤدي هذه الجسيمات المشحونة إلى عملية التأين. ولهذا الغرض يوضع داخل الكاشف النيوتروني مادة من المواد التي يمكن أن ينطلق منها بروتونات أو جسيمات ألفا نتيجة حدوث تفاعلات نووية مختلفة بينه وبين النيوترونات الساقطة. لذلك، يستخدم في العديد من غرف التأين الخاصة بالكشف عن النيوترونات غاز ثالث فلوريد البور BF_3 . فعند سقوط النيوترونات على هذا الغاز يتفاعل بعضها مع البور وينتج عن ذلك انطلاق جسيمات ألفا طبقا للتفاعل التالي:

$$^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}\alpha$$

ويقوم جسيم ألفا بتأيين ذرات أو جزيئات الغاز. وجدير بالذكر أن كفاءة الكاشف النيوتروني تكون صغيرة وتتوقف على عوامل كثيرة منها طاقة النيوترونات وكثافة الغاز وحجم الغرفة. ولا تستخدم نوافذ في

الكواشف النيوترونية بسبب قدرة النيوترونات الفائقة على اختراق جدار الغرفة.

4-4-5غرف التأين النبضية pulse-type ionization chamber

تستخدم غرف التأين النبضية لدراسة كل جسيم على حدة، أي عند تعاقب الجسيمات والإشعاعات الساقطة الواحد تلو الآخر بفارق زمني يسمح بالانتهاء من تسجيل الجسيم السابق. لذلك، يجب أن يكون زمن استمرار النبضة الكهربية (pulse-duration) الناتجة عن الجسيم صغيرا جدا، وذلك للتمييز بين الجسيمات المتتابعة. ويعتمد زمن استمرار النبضة على ثابت الزمن RC للغرفة ولجهاز القياس، وعلى المسافة بين القطبين. ومن الواضح أن زمن استمرار النبضة وجهدها يعتمدان اعتمادا كبيرا على مكان حدوث التأين بالنسبة للمجمع، أي على وضع واتجاه أثر الجسيم في الغرفة. فإذا كان الأثر قريبا من المجمع فهذا يعني وصول الإلكترونات بسرعة إلى هذا القطب وبالتالي عدم فقد أي منها أثناء الانتقال، مما يؤدي إلى ظهور نبضة جهد عالية على المخرج. أما إذا مر جسيم آخر بالطاقة نفسها بعيدا عن المجمع فإن الإلكترونات الناتجة عن طول أثره تستغرق وقتا طويلا للوصول إلى المجمع ويضيع جزءا منها بسبب التصادمات مع جزيئات الغاز، مما يؤدي إلى إضعاف التيار الكهربائي وبالتالي نبضة الجهد الخارجة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن جهد النبضة وزمن استمرارها يتوقفان على زمن وصول كل من الإلكترونات إلى المجمع والأيونات إلى قطب الجهد العالي. ولما كانت حركة الإلكترونات سريعة (حيث تبلغ سرعتها في الغرفة حوالي 10^{-6} م/الثانية)، وحركة الأيونات بطيئة (حيث تبلغ سرعتها حوالي 10^{3} م/الثانية) فإن الجهد الناتج من المركبة الإلكترونية يصل إلى أقصى قيمة له خلال زمن قصير (في حدود 10^{-6} ثانية). أما الجهد الناتج عن المركبة الأيونية فيصل إلى أقصى قيمة له خلال زمن كبير (حوالي 10^{-3} ثانية). وبالنسبة للغرفة ذات الأقطاب المستوية يمكن

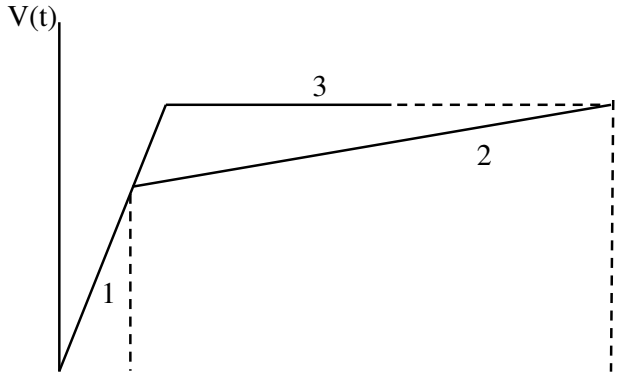
إثبات أن جهد المركبة الإلكترونية أو الأيونية كدالة من الزمن t يمكن تحديده من العلاقة:

$$V(t) = n e v t / C d$$

حيث n عدد الإلكترونات أو الأيونات المتكونة، v السرعة الانسياقية للإلكترونات أو الأيونات C السعة الداخلية للغرفة، d المسافة بين القطبين. ويبين شكل (4–6) كيفية تغير جهد كل من المركبة الأيونية والمركبة الإلكترونية لغرفة التأين كدالة من الزمن.

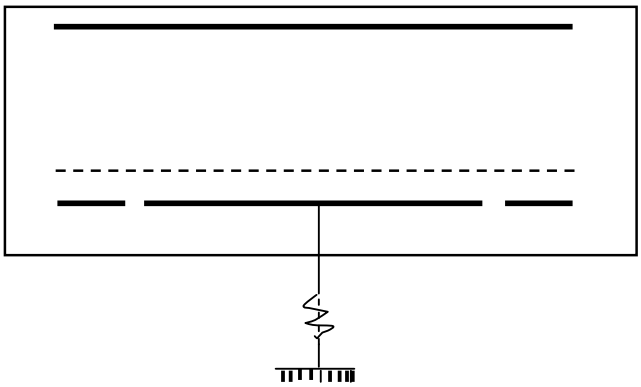
وتعكس هذه العلاقة اختلاف جهد النبضة باختلاف السرعات الانسياقية للإلكترونات والأيونات. لذلك، تعتبر غرفة التأين من هذا النوع بطيئة. ويمكن عمل أنواع أخرى سريعة، وذلك باستخدام شبكة فلزية تثبت بين المجمع وقطب الجهد العالي، وتكون أقرب إلى المجمع (شكل 4–7). ويكون جهد هذه الشبكة واقعا بين الصفر (جهد المجمع) والجهد العالي V ويؤدي إدخال هذه الشبكة إلى خفض السعة C بين مسار الجسيم والقطب المجمع. وبالتالي، تصبح العلاقة بين جهد المركبة الإلكترونية وبين الزمن كالمبين بالمنحنى (3) شكل (4–6)

وهكذا يجب أن تحتوي غرف التأين النبضية على شبكة، ويجب أن تملأ الغرف بغاز من النوع الذي لا تتكون فيه أيونات سالبة. لذلك، يفضل استخدام الغازات الخاملة في هذا النوع من الغرف. كذلك، يجب



10^{-6} 10^{-3} t

شكل (4–6)
تغير جهد كل من المركبة الإلكترونية (1) والأيونية (2) كدالة من الزمن t
وتغير جهد المركبة الإلكترونية (3) كدالة من الزمن بعد وضع الشبكة الفلزية



شكل (4–7)
الشبكة الفلزية في غرفة التأين

أن يكون فرق الجهد بين القطبين كبيرا (عند نهاية العتبة في شكل 4–6) وذلك كي تكون السرعة الانسياقية للإلكترونات ثابتة ولا تعتمد على فرق الجهد بين القطبين. ويستخدم غاز الأرجون في معظم هذه الغرف. ويضاف إليه عادة نسبة صغيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون (حوالي5%)، وذلك لضمان بقاء السرعة الانسياقية ثابتة وعدم زيادتها بزيادة فرق الجهد بين القطبين.

وتجدر الإشارة إلى أن غرف التأين النبضية لا تستخدم عموما للكشف عن جسيمات بيتا وذلك بسبب صغر التأين النوعي S لهذه

الجسيمات، مما يؤدي إلى إنتاج عدد قليل من الإلكترونات نتيجة جسيم بيتا واحد، وبالتالي يكون التيار الناتج ضعيفا ويصعب تكبيره وتسجيله.

4-4-6 القدرة التحليلية للطاقة Energy resolving power

من أهم خصائص غرف التأين النبضية الخاصية المعروفة باسم القدرة التحليلية للطاقة (energy resolving power). فعند سقوط عدد جسيمات ألفا ذات طاقة واحدة على نافذة الغرفة فإن هذه الجسيمات تعبر النافذة إلى داخل الغرفة باختلاف طفيف في طاقاتها، وذلك بسبب حدوث تبعثر في طاقة الجسيمات المختلفة. وفضلا عن ذلك فإنه حتى في حالة دخول هذه الإشعاعات (مثل إشعاعات جاما) إلى الغرفة بالطاقة نفسها فإن كل فوتون يطلق إلكترونا أو زوجا إلكترونيا بوزترونيا يكون بدوره عددا مختلفا من الأزواج الإلكترونية الأيونية، وذلك لأن عملية التأين عملية إحصائية بحتة. كذلك، فإنه عند انتقال الإلكترونات إلى المجمع يمكن أن يضيع بعضها بسبب التصادمات مع ذرات الغاز ومع الأيونات الموجبة، وبالتالي فإن الجسيمات ذات الطاقة الواحدة يمكن أن تنتج نبضات كهربية يختلف تيارها (وبالتالي جهدها) اختلافا طفيفا. ويقال أنه حدث توزع للطاقة. لذلك، فإنه عند تسجيل عدد كبير من الجسيمات ذات طاقة واحدة E_0 يحدث توزع في طاقاتها ويظهر طيفها (spectrum) على صورة قمة كالمبينة في شكل (4-8). وتعرف القيمة ΔE باسم العرض الكامل عند منتصف الارتفاع full width at half-maximum (FWHM). وبمعرفة قيمة التوزع في الطاقة ΔE وطاقة الجسيمات الساقطة E_0 تحدد القدرة التحليلية r للكاشف، كنسبة مئوية، كالآتي:

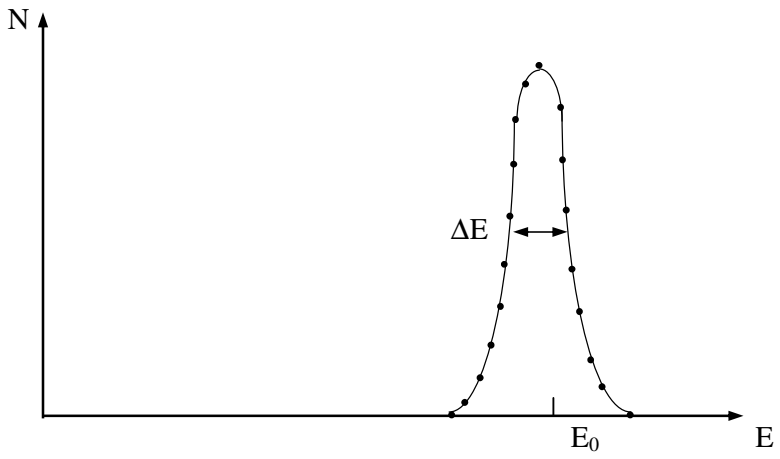
$$r = \Delta E / E_0 \times 100\% \qquad (4\text{-}15)$$

وتعتمد قيمة التبعثر ΔE عموما، على طاقة الجسيمات الساقطة حيث تزداد بزيادتها كما تعتمد ΔE على عوامل أخرى كثيرة مثل سمك النافذة وضغط الغاز وحجم الغرفة وغيره. لذلك، تتفاوت القدرات التحليلية للغرف المختلفة. وتتراوح القدرة التحليلية للطاقة لغرف التأين بين حوالي 0.3 % ، 7 % وذلك تبعا للحجم وشكل النافذة وفرق الجهد والسعة الداخلية وغيره . ومعرفة القدرة التحليلية للكاشف أمر مهم جدا. فعند وجود جسيمات ذات طاقات مختلفة فإنه يمكن فصل هذه الطاقات

عن بعضها باستخدام الكاشف المعين إذا كان الفرق في الطاقة أكبر من ΔE. أما إذا كان الفرق في الطاقة أقل من ΔE فإنه لا يمكن فصل هـذه الطاقات عن بعضها وتتداخل قممها.

4-5 العدادات التناسبية The proportional counters

عند زيادة فرق الجهد بين قطبي غرفة التأين إلى قيم عالية يبـدأ التيار في الزيادة السريعة فوق قيم التشبع I_S . ويعود السبب في ذلك إلى



شكل (4-8)
توزع طاقة جسيمات ذات طاقة واحدة

أن الإلكترونات الناتجة عن التأين والواقعة تحت تـأثير فـرق الجهـد تكتسب طاقة حركية تتناسب مع مقدار فرق الجهد الذي تجتازه. وعنـد زيادة فرق الجهد تزيد الطاقة التي تكتسبها هذه الإلكترونات فتصـبح (الإلكترونات) قادرة على تأيين ذرات جديدة للغـاز، وبالتـالي تكـوين مجموعة ثانوية من الأزواج الإلكترونية – الأيونية، تنضم إلى المجموعة الأولية التي نتجت بفعل الجسيم النـووي. وتسـتمر إلكترونـات كلتـا المجموعتين في الحركة بتأثير الجهد وبالتالي تكتسب طاقة جديدة فتؤدي

إلى مرحلة جديدة من التأين الثانوي. وهكذا، فإن الإلكترونات الناتجة من التأين الأولي بفعل الجسيم النووي يتبعها عدة مراحل تأين ثانوي تؤدي إلى مضاعفة عدد لإلكترونات. وهذه المراحل المتتابعة من التأين الثانوي الناتج عن الجهد الكبير تختلف اختلافا تاما عن مفهوم التأين الثانوي الناتج عن جسيمات بيتا ذات الطاقة العالية والذي يحدث دون النظر لشدة المجال. وينتج عن تتابع التأين تكاثر هائل لعدد الإلكترونات. وبالإضافة إلى ذلك فعند تصادم الإلكترونات المعجلة بجزيئات الغاز أو عند حدوث إعادة التحام بين الأعداد الهائلة من الإلكترونات والأيونات تنطلق فوتونات (أشعة سينية) نتيجة لإثارة هذه الجزيئات عند التصادم. ويمكن أن تؤدي هذه الفوتونات إلى تحرير عدد آخر من الإلكترونات من سطح قطب الجهد العالي أو من جزيئات الغاز التي يكون جهد تأينها صغيرا (في حالة وجود خليط من الغازات). وبذلك، يمكن أن تشترك الفوتونات في عملية التأين الثانوي. وبالتالي تنتشر عملية التأين في الحجم الكلي للغاز، ويحدث ما يشبه التفريغ الكهربائي للغاز (gas discharge).

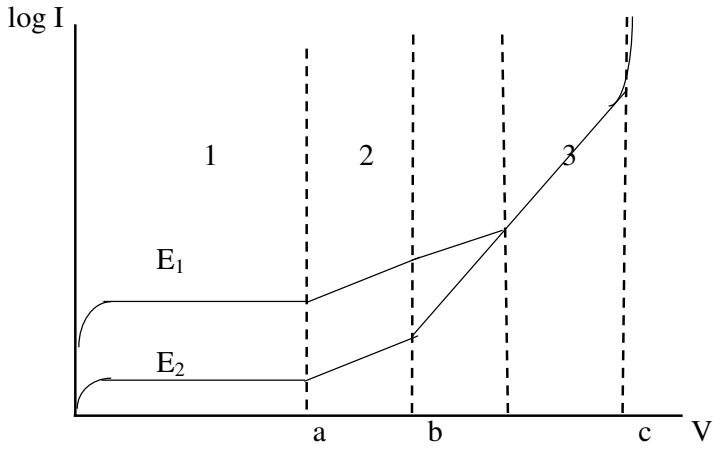
فإذا كان احتمال تكوين إلكترون كهروضوئي بواسطة الإلكترون الواحد هو γ وكان عدد الإلكترونات الثانوية الناتجة عن تصادم إلكترون واحد بالذرات n ، يكون $n\gamma$ عبارة عن عدد الإلكترونات الكهروضوئية الناتجة عن n إلكترون ثانوي. ثم يتضاعف هذا العدد بفعل التصادمات مكونا $n^2\gamma$ إلكترونا ثانويا. وهذا العدد الأخير يؤدي بدوره إلى تكوين $n^2\gamma^2$ إلكترون كهروضوئي. وبجع جميع عناصر هذه المتوالية الهندسية وقسمته على عدد الإلكترونات الابتدائية يمكن إيجاد معامل التضاعف M للعداد التناسبي وهو:

$$M = n / (1 - n\gamma) \qquad (4\text{-}16)$$

ويبين معامل التضاعف M عدد مرات تضاعف الإلكترونات الابتدائية (أي الناتجة عن الجسيم النووي ذاته). فإذا كان مقدار $1 >> n\gamma$ يصبح معامل تضاعف العداد مساويا $M = n$. ويكون هذا التضاعف ناتجا عن التأين الثانوي فقط، ولا تلعب الفوتونات دورا ملحوظا في التأين، وبالتالي يمكن إهمالها واعتبار مقدار γ مساويا للصفر. ويسمى العداد في هذه الحالة بالعداد التناسبي (proportional counter) نظرا لأن

العدد الكلي للإلكترونات الثانوية يتناسب مع عدد الإلكترونات الابتدائية الناتجة عن الجسيم النووي.

وهكذا، فإنه عند زيادة فرق الجهد بين القطبين فيما بعد عتبة التشبع (النقطة a على الشكل 4–9) لغرفة التأين يبدأ العداد في العمل كعداد تناسبي. ويبين شكل (4–9) منطقة الجهود التي يتحقق عندها تشغيل العداد في المنطقة التناسبية وهي المنطقة 2. وفي هذه المنطقة



شكل (4–9)
العلاقة بين الجهد والتيار في العدادات
1– منطقة غرفة التأين
2– منطقة العداد التناسبي
3– منطقة عداد غايغر– ميولر

يزداد التيار زيادة كبيرة (من 1 إلى 1000 مرة) حسب مقدار الجهد المطبق V . وعلى الرغم من زيادة التيار فإنه يستمر متناسبا مع عدد الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة عن الجسيم النووي، وبالتالي متناسبا مع طاقة هذا الجسيم. فعند دخول جسيمين ذوي طاقتين مختلفتين بحيث تكون $E_2 < E_1$ (شكل 4–9) ينتج عنهما تياران مختلفان، وبالتالي جهدان

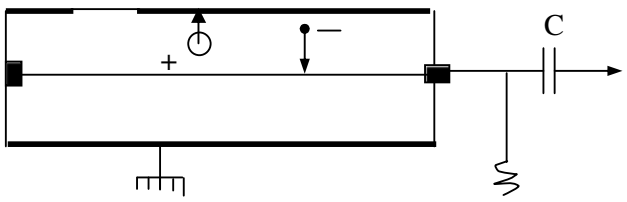
مختلفان، سواء في منطقة غرفة التأين أو في منطقة العداد التناسبي، مما يمكن من فصل هاتين الطاقتين. وفي نهاية منطقة العداد التناسبي يصبح من الصعب تمييز الطاقات المختلفة للجسيمات.

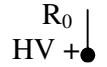
ويمكن من حيث المبدأ أن تكون العدادات التناسبية مستوية الأقطاب ولكنها تجهز على شكل اسطوانة (شكل4–10) حيث يقوم السلك المحوري الرفيع بدور المجمع (الأنود). لذلك، فهو يوصل بالقطب الموجب لمنبع الجهد العالي. أما جسم الأسطوانة فيوصل بالأرض (أي بالقطب السالب لمنبع الجهد العالي)، وتتجمع عليه الأيونات الموجبة. وفي حالة وجود نافذة يمكن أن تكون هذه النافذة على الجدار الأسطواني للعداد أو في قاعه. أما السعة C فالغرض منها منع وصول الجهد المستمر من منبع الجهد إلى جهاز القياس.

وبالنسبة للعداد الأسطواني يمكن إيجاد شدة المجال الكهربائي E في أية نقطة بداخله تبعد مسافة r من محور الأسطوانة، وذلك باستخدام العلاقة المعروفة التالية:

$$E = V / r \ \ln(b/a) \qquad (4\text{-}17)$$

حيث: V هي جهد المجمع (الأنود)، b هو نصف القطر الداخلي للأسطوانة، a هو نصف قطر السلك المحوري. فإذا كان جهد السلك 1000 فولت، b = 1سم، a = 0.01 سم تصل شدة المجال على مسافة 0.01سم من السلك إلى حوالي 6000 فولت/سم. لذلك، نجد أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من سلك الأنود. أما إذا تكونت الإلكترونات الابتدائية بعيدا عن المجمع فإنها تتحرك أولا بفعل المجال في اتجاه المجمع ثم تبدأ مراحل التأين الثانوي عند اقترابها منه (في حدود 0.1سم من مركزه).





شكل (4–10): العداد التناسبي

4–5–1 شكل نبضات العداد التناسبي

Pulse shape of the proportional counter

تستخدم العدادات التناسبية، عموما، في النظام النبضي وليس في نظام التيار المستمر. وتنتج النبضة في العداد التناسبي عن المركبة الأيونية أساسا وليس عن المركبة الإلكترونية للتيار. ويرجع السبب في ذلك إلى تكون سحابة أيونية (ناتجة عن التأين) بالقرب من المجمع (الأنود). فعند وصول الإلكترونات السريعة إلى الأنود تكون الأيونات الموجبة ما زالت بالقرب منه فتعادل بذلك أثر الإلكترونات على جهد الأنود. ويمكن تحديد قيمة الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية للتيار وذلك باستخدام العلاقة النظرية التالية:

$$V' / V_\infty = l' / a \ln (b/a) \qquad (4\text{-}18)$$

حيث V' جهد النبضة الناتج عن المركبة الإلكترونية بعد مرور وقت كاف من بدئها، V_∞ هو الجهد الكلي للنبضة، l هو متوسط المسار الحر للإلكترونات. فعند استخدام عداد تناسبي بالأبعاد السابقة نفسها وعندما يكون الضغط داخل العداد مساويا 0.5 ضغط جوي تكون l في حدود 2.5×10^{-3} سم. عندئذ تصبح:

$$V' / V_\infty = 0.05$$

أي أن الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية يشكل حوالي 5 % من الجهد الكلي للنبضة.

وحيث أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من الأنود فإنه عندما يكون معامل التضاعف M كبيرا لا يعتمد جهد النبض على مكان مرور الجسيم النووي في العداد. ويمكن إيجاد كيفية تغير النبضة كدالة من الزمن طبقا للعلاقة النظرية التالية:

$$V^{+}(t) = [M N_0 e / 2C_0 \ln(b/a)] \ln(1+ 2 \mu^{+} V / p a^2 \ln(b/a) \quad (4\text{-}19)$$

حيث N_0 عدد الأزواج الابتدائية الناتجة عن الجسيم النووي نفسه، M معامل التضاعف للعداد، e شحنة الإلكترون، C_0 سعته الداخلية، μ^{+} حركية الأيونات ، p الضغط داخل العداد. لذلك، يزداد جهد النبضة أولا بطريقة خطية مع الزمن، ثم يقل معدل الزيادة مع الزمن بحيث تصبح العلاقة لوغاريتمية، إلى أن يصل الجهد إلى أقصى مقدار له وهو:

$$V^{+}_{max} = M N_0 e / C_0$$

عند زمن t مقداره:

$$t = (b^2 - a^2) P \ln (b/a) / 2 \mu^{+} V \quad (4\text{-}20)$$

ويبين الشكل (4–11) كيفية تغير نبضة جهد الخرج كدالة من الزمن لعداد تناسبي بالأبعاد المذكورة سلفا. عند ضغط مقداره 0.05 ضغط جوي وجهد أنودي V = 1500 فولت. ويلاحظ أن معدل نمو جهد النبضة يكون سريعا في البداية، ثم يقل هذا المعدل وتزداد النبضة ببطئ إلى أن يصل جهدها إلى أقصى قيمة له. ويمكن أن تستمر النبضة عند هذه القيمة لفترة طويلة (ربما تصل إلى حوالي 1 ميللي ثانية) وخلال هذا الزمن يكون العداد غير مستعد لاستقبال أي جسيم آخر أو تسجيله.

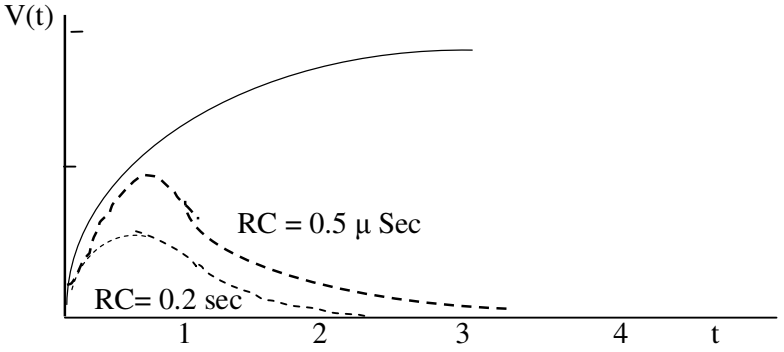
ويمكن خفض زمن استمرار النبضة بشكل ملحوظ وذلك بتشكيل النبضة باستخدام دارات التشكيل المختلفة. وتستخدم عادة لهذا الغرض الدارة التفاضلية (differentiation circuit) التي تتكون من مقاومة ومكثف عند مخرج العداد أو في مدخل المكبر. وتبين المنحنيات المتقطعة على الشكل(4–11) كيفية تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضلية بثابت زمني (RC) مختلف. ويلاحظ أنه كلما انخفض ثابت الزمن للدارة التفاضلية قل زمن استمرار النبضة وانخفض جهدها في الوقت نفسه.

وتجدر الإشارة إن جهد النبضات الناتجة عن الجسيمات نفسها والطاقات نفسها في العداد التناسبي تتراوح ضمن حدود معينة ΔV. ويؤدي هذا بدوره إلى تفاوت في تحديد طاقات الجسيمات مقداره ΔE .

ويرجع السبب في ذلك لما سبق ذكره بالنسبة لغرفة التأين وكذلك لعـــدة أسباب أخرى أهمها ما يلي:

أ- حدوث اختلاف في عدد الإلكترونات الثانوية لخضوعها لقوانين الاحتمالات.
ب- عدم تجانس سلك المجمع حيث يمكن أن يختلف نصـــف قطره اختلافا طفيفا من مكان لآخر.
ج- اختلاف المجال في منتصف العداد وعند أطرافـــه (فـــي حالة عدم وجود حلقات حارسة).

لذلك، فإن القدرة التحليلية للطاقات للعداد التناسبي تكون أسوأ من مثيلتها بالنسبة لغرفة التأين. ويبلغ مقدار القدرة التحليلية للطاقة للعدادات التناسبية حوالي 10 – 30 %.



شكل (4-11)
تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضلية بثابت زمني (RC) مختلف

زمن التأخير The delay time

يجب التنويه بحدوث تأخير زمني بين لحظة دخول الجسيم للعداد وخروج نبضة الجهد على المخرج. وهذا التأخير ناتج من زمن مـــرور الإلكترونات الأولية من مكان تكونها داخل العداد إلى أن تقتـــرب مـــن

المجمع. وبالتالي، يعتمد زمن التأخير (delay time)على مكـــان مـــرور الجسيم النووي ويمكن حساب أكبر مقدار له من نصف القطر الـــداخلي للاسطوانة والسرعة الانسياقية للإلكترونات كالتالي:

$$t_d = b / v^-$$

ومن أهم عيوب العدادات التناسبية اعتماد معامل التضـــاعف M على الجهد مما يؤدي إلى اختلاف جهد النبضة الخارجة عنـــد حـــدوث تغير طفيف في جهد المنبع. لذلك، فإنه يجب استخدام منبع جهد عال ذي استقرارية عالية (highly stabilized).

6-4 عدادات غايغر – ميولر Geiger – Muller counters

عند زيادة الجهد بين قطبي العداد التناسبي إلى ما بعـــد منطقـــة التناسب (فيما بعد النقطة b شكل 4-9) يزداد معامـــل التضـــاعف M زيادة هائلة وبالتالي يزداد التيار زيادة طارئة (شـــكل 4-9). ويرجـــع السبب في ذلك إلى زيادة احتمال انطلاق الفوتونات فوق البنفسجية عنـــد تصادم الإلكترونات بجزيئات الغاز وتكوين إلكترونات كهروضوئية (أي زيادة قيمة الاحتمال γ). وعند هذه الجهود العالية تصبح هذه الفوتونات هي المسؤول الأساسي عن الإلكترونات الثانوية. وينتشر التأين الثـــانوي في جميع أنحاء العداد، وبالتالي يصل العداد إلى حالة التفريغ الكهربائي، وينتج عن ذلك تيار كبير للغاية دون النظر لعدد الإلكترونات الأوليـــة. ويعرف العداد عند هذه الجهود باسم عداد غـــايغر – ميـــولر (وهمـــا مكتشفاه).

وبالرجوع إلى العلاقة (4-16) يلاحظ أن هذا الأمر يتحقق عندما تصبح قيمة $n \gamma = 1$. عندئذ يصبح معامل التضاعف M عبارة عن ما لانهاية، أي أن:

$$M = n / (1-1) = \infty$$

وفي هذه الحالة فإن جهد النبضة لم يعـــد يتوقـــف علـــى عـــدد الإلكترونات الأولية الناتجة عن الجسيم النووي. إذ أنه يكفي تكون زوج إلكتروني – أيوني لبدء عملية التفريغ وظهور جهد النبضـــة. وبالتـــالي

يلاحظ أن جهد النبضة لم يعد يتوقف على طاقة الجسيم النووي المسبب لها. لذلك، لا يستخدم عداد غايغر– ميولر لتحديد طاقة الجسيمات النووية، وإنما فقط لتسجيل عدد هذه الجسيمات دون النظر لطاقاتها.

وبمجرد بدء التأين والتفريغ الكهربي لا يتوقف مرور التيار داخل العداد ذاتيا وإنما يستمر حتى في حالة عدم وصول جسيمات نووية جديدة. لذلك، فإنه يجب إيقاف عملية التفريغ داخل العداد ليكون جاهزا لاستقبال جسيم جديد وتسجيله. ويوجد نوعان من عدادات غايغر – ميولر يختلفان باختلاف طريقة إيقاف التفريغ وهما عدادات ذات إطفاء خارجي والأخر ذات إطفاء ذاتي.

4-6-1 عدادات غايغر ذات الإطفاء الخارجي

Non – self quenching G.M counters

عندما يملأ العداد بغاز خامل (مثل الأرجون) تؤدي الفوتونات فوق البنفسجية إلى انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية من المصعد (الكاثود الذي تمثله الاسطوانة الخارجية) وليس من ذرات الأرجون. وتتحرك جميع الإلكترونات في اتجاه المجمع (شكل 4-10) الذي تتكون حوله سحابة أيونية كثيفة تتحرك بدورها في اتجاه المهبط. وعند تحرك هذه السحابة إلى المهبط يبدأ التيار في المرور ويؤدي إلى ظهور نبضة الجهد على المقاومة R_0 ، وعند وصول هذه السحابة الأيونية إلى المهبط تنتج فوتونات فوق بنفسجية جديدة وإلكترونات ثانوية فيستمر التيار في المرور ولا يتوقف. وهكذا، يستمر مرور التيار طالما بقي الجهد V عاليا ولم يتم تخفيضه بأي وسيلة خارجية. ولتخفيض مقدار الجهد يمكن اختيار قيمة R_0 كبيرة للغاية (في حدود $10^{8} - 10^{9}$ أوم). فعند تحرك السحابة الأيونية بعيدا عن المجمع ينخفض جهده بما يعادل الجهد المستهلك على المقاومة R_0 I . أي أن مقدار جهد المجمع (الأنود) عند تحرك السحابة الأيونية يصبح $V_a = V - IR_0$ ،حيث I تيار السحابة الأيونية. فإذا كانت قيمة R_0 كبيرة ينخفض جهد المجمع، بحيث يصبح أقل من الجهد اللازم لاستمرار التفريغ (أقل من V_b شكل 4-9). لذلك فإنه عند وصول السحابة الأيونية للمهبط يكون الجهد أقل من الحد اللازم لاستمرار التفريغ وبالتالي يطفأ العداد. فإذا كان زمن انتقال الأيونات

داخل العداد 200 ميكروثانية وسعه الداخلية في حـــدود 10 بيكوفـــارد يجب أن تكون قيمة R_0 في حدود $4x10^{8}$ أوم. وبعد أن يطفـــأ العـــداد يكون جهد المجمع أقل من الجهد اللازم لتشغيله في منطقة غايغر، فيبدأ هذا الجهد في الزيادة من جديد إلى أن يصل إلى القيمة الأصلية V بعـــد زمن كبير بالمقارنة بثابت الزمن $R_0 C_0$ (بعد حـــوالي 10^{-3} ثانيـــة). وخلال هذا الوقت الذي يستعيد فيه العداد جهده على المجمع يكون العداد غير مستعد لاستقبال جسيمات جديدة. ولو دخل جسيم إلى العداد خـــلال هذا الزمن فإنه يمكن أن يسجل ولكن تكون النبضة الناتجة ضعيفة للغاية بحيث لا يحس بها الجهاز الإلكتروني التالي. وتعرف هذه الفترة الزمنية باسم فترة الاسترجاع (recovery time). ويلاحظ أن أهم عيوب هذا النوع من العدادات هو كبر فترة الاسترجاع (حوالي 10^{-3} ثانية).

4-6-2 عدادات غايغر ذات الإطفاء الذاتي

Self – quenching G.M counters

يتميز هذا النوع من العدادات بعدم وجود مقاومة كبيرة لخفـــض جهد المجمع (الأنود) وإنما تستخدم مقاومة صغيرة. بذلك، يبقى الجهـــد ثابتا على الأنود ولا ينخفض إلى ما دون حد جهد غـــايغر. ولإحـــداث الإطفاء في هذا النوع من العدادات يملأ العداد بخليط من غاز الأرجون (حوالي 90%) وبخار مركب متعدد الذرات مثل الكحول أو الأســـيتون (حوالي 10%). وعند دخول الجسيم النووي يحدث التأين الابتدائي ثـــم تتبعه مجموعة التأينات الثانوية بالقرب من الأنود وتنطلـــق الفوتونـــات فوق البنفسجية التي تؤدي إلى انطـــلاق الإلكترونـــات الكهروضـــوئية بالأسلوب نفسه المتبع في عدادات غايغر السابقة. ولكن يحدث اخـــتلاف في هذه العدادات، يرجع أساسا إلى قابلية بخار الكحـــول أو الأســـيتون العالية لامتصاص الفوتونات فـــوق البنفســـجية. بـــذلك، تمـــتص هـــذه الفوتونات في الغاز ولا تصل إلى المهبط. وبذلك تكـــون الإلكترونـــات الكهروضوئية صادر من جزيئات بخـــار الكحـــول ولـــيس مـــن ذرات الأرجون أو ذرات مادة المهبط (الكاثود) الفلزية. ونظرا للقابلية العاليـــة لامتصاص الفوتونات في جزيئات الكحول وتأينها فإن هذه الفوتونات لا تبتعد كثيرا عن الأنود وينحصر التفريغ الكهربي بالقرب منه. وهكـــذا،

تتحرك السحابة الأيونية في اتجاه المهبط مكونة بذلك النبضة الكهربائية التي لا تتأثر بالمركبة الإلكترونية. وتتكون الأيونات الموجبة التي تصل إلى المهبط كليا من أيونات جزيئات الكحول أو الأسيتون وذلك لامتصاص الفوتونات بواسطة هذه الجزيئات، وكذلك لأنه عند تحرك أيون أرجون موجب في اتجاه المهبط فإنه يكتسب إلكترونا عند اصطدامه بجزيء الكحول المتعادل الذي بدوره يتحول إلى أيون موجب (لأن طاقة ارتباط الإلكترون بذرة الأرجون أعلى من طاقة ارتباط الإلكترون بجزيء الكحول). وعند وصول أيونات الكحول الموجبة إلى المهبط فإنها لا تؤدي إلى انبعاث إلكترونات ثانوية من مادة المهبط، وبالتالي يحدث الإطفاء ذاتيا. وهكذا، يمكن تلخيص دور جزيئات الغاز المتعددة الذرات مثل بخار الكحول أو الأسيتون في الآتي:

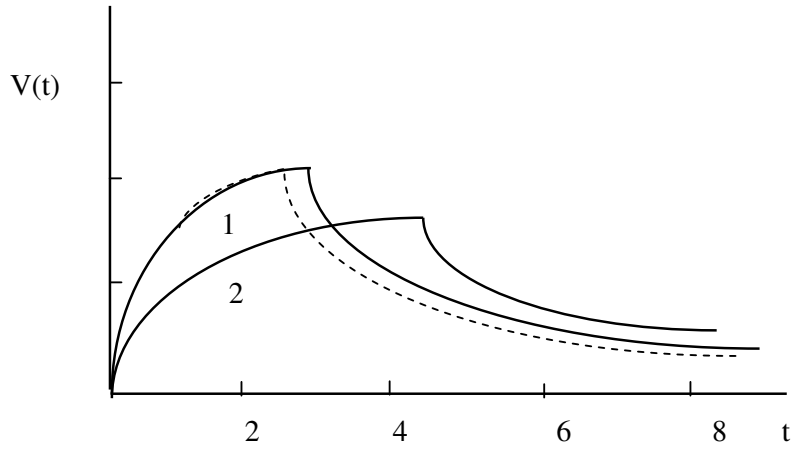
1- منع وصول الفوتونات إلى المهبط، وبالتالي منع انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية منه.
2- منع وصول أيونات الأرجون الموجبة إلى المهبط، وبالتالي منع انبعاث الإلكترونات الثانوية منه.

4-6-3 شكل النبضة والزمن الميت وزمن الاسترجاع

تتكون نبضة التيار الناتجة على مخرج عداد غايغر ذي الإطفاء الذاتي من المركبة الأيونية فقط. وتتحرك السحابة الأيونية في اتجاه المهبط مكونة شكلا أسطوانيا رفيعا في أية لحظة. ويستعرض شكل (4-12) الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفاء الذاتي (الخط المتصل 1)، وكذلك الشكل النظري الناتج عن المركبة الأيونية. ويعتمد زمن امتداد النبضة على الأبعاد الهندسية للعداد. كما يعتمد شكلها على مكان حدوث التأين الابتدائي بالنسبة للمصعد (للأنود). فكلما بعد أثر الجسيم النووي عن المصعد زاد الامتداد الزمني للنبضة وقلت القيمة القصوى للتيار الناتج عنها (الخط المتصل 2).

الزمن الميت The dead time

أثناء عملية التضاعف الإلكتروني وانتقال السحابة الأيونية من حول المصعد (الأنود) إلى المهبط (الكاثود) يكون العداد غير حساس لاستقبال جسيم نووي جديد، نظرا لانخفاض شدة المجال الكهربائي بين القطبين في هذا الوقت. وبمجرد وصول السحابة الأيونية للمهبط فإنه يسترجع جهده بسرعة وتعود شدة المجال بين القطبين إلى قيمتها الأصلية. ويعرف الزمن بين لحظة دخول الجسيم النووي ووصول الجهد على المصعد إلى عتبة غايغر (النقطة b شكل 4–9) بالزمن الميت للعداد (The dead time). وخلال هذا الزمن يكون العداد غير حساس لتسجيل أي جسيم آخر.



شكل (4–12)

(1) الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفاء الذاتي.
(2) شكل النبضة عند ابتعاد أثر الجسيم النووي عن المصعد

زمن الاسترجاع The recovery time

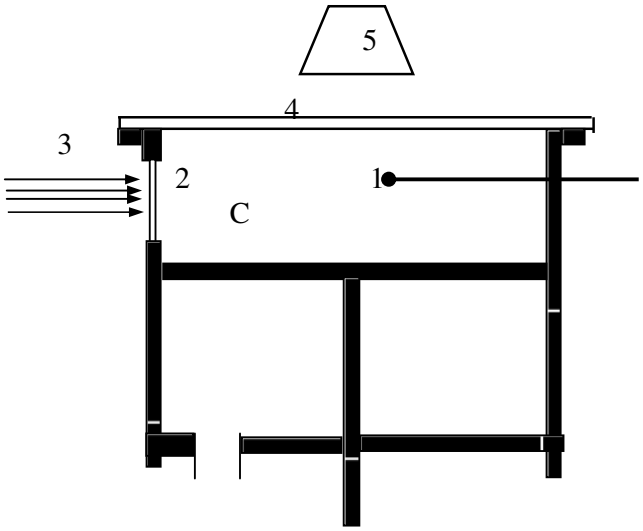
تعرف الفترة الزمنية بين وصول الجهد إلى عتبة غايغر ووصوله إلى القيمة القصوى بزمن الاسترجاع (the recovery time). وتعتبر هذه الفترة صغيرة بالنسبة للعدادات ذات الإطفاء الذاتي (حوالي

5×10^{-6}) ثانية، وذلك بسبب صغر قيمة المقاومة R_0. وخلال زمن الاسترجاع يستطيع العداد تسجيل الجسيم النووي ولكن يكون تيار (أو جهد) النبضة أقل.

وعموما، تختلف عدادات غايغر باختلاف الغرض المخصصة له. فتوجد منها أنواع ذات نوافذ وأخرى بدونها، وذلك تبعا لنوع الجسيمات أو الإشعاعات المطلوب الكشف عنها. وهناك أنواع يستخدم فيها غاز ثالث فلوريد البور BF_3 أو يعمل فيها نافذة من مادة البور وذلك لاستخدامها للكشف عن النيوترونات.

4-7 الغرفة السحابية The cloud chamber

تعتبر الغرفة السحابية من أقدم الوسائل المستخدمة للكشف عن الجسيمات المشحونة بالرؤية المباشرة حيث استخدمها ويلسون لأول مرة عام 1912م. ويبين شكل (4-13) رسما توضيحيا للغرفة السحابية، حيث يملأ الفراغ الداخلي للغرفة بالهواء النقي تماما من الغبار والمشبع ببخار الماء عند درجة حرارة الغرفة. وعند تحرك المكبس فجأة وبسرعة عالية إلى أسفل يحدث تمدد مفاجئ لخليط الهواء وبخار الماء مما يؤدي إلى الانخفاض المفاجئ في درجة حرارة الخليط ويصبح بخار



شكل (4-13): الغرفة السحابية

1- مصدر مشع	2- نافذة لدخول الضوء
3- الضوء	4- غطاء شفاف
5- آلة تصوير	6- المكبس
7- فتحة خروج الهواء	

الماء في حالة ما فوق التشبع. فإذا مرت في هذه اللحظة جسيمات مشحونة وأدت إلى تكوين أزواج إلكترونية-أيونية داخل الفراغ C يتكثف بخار الماء فوق المتشبع على الأيونات، ويظهر أثر لقطرات الماء المتكثفة على الأيونات بطول أثر الجسيمات المشحونة. ويمكن رؤية هذه القطرات، وبالتالي أثر الجسيم إما بالعين المجردة أو بالتصوير في هذه اللحظة، وذلك بإدخال ضوء من فتحة جانبية والتصوير خلال الغطاء الشفاف العلوي للغرفة. وبعد التصوير يعاد المكبس إلى وضعه الأصلي، ويتم توصيل جهد بالغرفة لسحب الأيونات من داخلها فتصبح الغرفة بذلك مستعدة لدورة قياسات أخرى. وعموما، يتم تجهيز الغرفة بأدوات لسحب المكبس والتصوير وإعادة المكبس، بحيث تتم الدورة بأكملها وتصبح الغرفة جاهزة آليا.

وتعريف نسبة فوق التشبع S هو:

$$S = P_f / P_I \qquad (4\text{-}21)$$

حيث P_f ، P_i هو الضغط بعد وقبل التمدد على الترتيب. كذلك فإن نسبة التمدد E هي:

$$E = \tau_f / \tau_i \qquad (4\text{-}22)$$

حيث τ_f ، τ_i هما حجم الغرفة بعد وقبل التمدد على الترتيب. وبالنسبة لخليط الهواء وبخار الماء يحدث التكثف على الأيونات السالبة فقط إذا

كانت قيمة E محصورة بين 1.25 ، 1.31 . ولكن يحدث التكثف على كل من الأيونات السالبة والموجبة إذا كانت قيمة E محصورة بين 1.31 ، 1.38 . أما إذا زادت E على 1.38 فيحدث التكثف في الفراغ كله دون النظر لوجود أيونات وتتكون سحابة داخل التجويف بأكمله. لذلك، فإنه يفضل أن تكون قيمة E في حدود 1.35 بالنسبة لخليط الهواء وبخار الماء. أما بالنسبة لخليط الأرجون والكحول فإنه يمكن الحصول على أفضل صورة عندما تكون E = 1.10 حيث يحدث التكثف على كل من الأيونات الموجبة والسالبة.

ويمكن استخدام الغرفة السحابية في تحديد شحنة الجسيم وزخمه وبالتالي طاقته. فإذا تعرض الفراغ الداخلي للغرفة بعد التمدد مباشرة لمجال مغناطيسي كثافة تدفقه B ينحرف مسار الجسيمات المشحونة تحت تأثير هذا المجال، ويصبح المسار عبارة عن جزء من محيط دائرة نصف قطرها R . وتحكم هذا المسار العلاقة المعروفة التالية الخاصة بحركة الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسي .

$$m\,v = q\,BR \qquad (4\text{-}23)$$

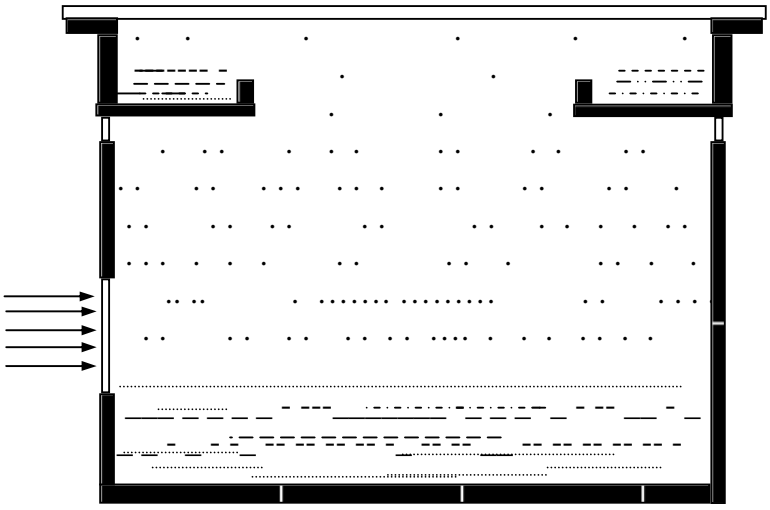
حيث m هي كتلة الجسيم النووي ، v هي سرعته و q شحنته. ويحدد اتجاه الانحراف نوع الشحنة (موجبة أو سالبة). كذلك، فإنه يمكن تحديد طاقة الجسيم من طول الأثر.

ومن أهم عيوب الغرف السحابية هو قصر الزمن الحساس (حوالي نصف ثانية). والزمن الحساس عبارة عن زمن استمرار القطرات المكثفة، حيث أن هذه القطرات تتبخر من جديد بسبب وصول الحرارة إليها من خارج الغرفة.

4-8 غرف الانتشار The diffusion chamber

نظرا لصغر الزمن الحساس للغرفة السحابية فقد تم تطوير غرفة جديدة سنة 1936 م، تعرف بغرفة الانتشار(شكل 4-14). وتتكون الغرفة من إناءين أحدهما علوي والأخر سفلي. ويملأ الإناء العلوي بسائل مثل الكحول الميثيلي (methyl alcohol) ، نظرا لأن بخاره قابل

للتكثف. وتكون درجة حرارة هذا الإناء هي درجة حرارة الغرفة. أما الإناء السفلي فيجب تبريده إلى حوالي(– 60) ° م ، وذلك باستخدام خليط من الكحول الميثيلي وثاني أكسيد الكربون المتصلب (أي في حالة صلبة)، فيؤدي ذلك إلى تدرج درجة الحرارة بين الإناء السفلي والعلوي. وعند تبخر السائل الموجود بالإناء العلوي ينتشر هذا البخار إلى أسفل بسبب انخفاض درجة الحرارة عند القاع. لذلك يكون البخار في حالة ما فوق التشبع في المنطقة السفلي من الغرفة. وعند مرور جسيم مشحون في هذه المنطقة وتكوين الأيونات يتكثف بخار عليها مكونا قطرات السائل، وبالتالي يمكن تصوير أثر الجسيم. ولإعداد الغرفة لدورة قياسات جديدة يجب سحب الأيونات من داخلها باستخدام مجال كهربائي. وتتميز هذه الغرفة عن سابقتها بكبر الوقت الحساس (حوالي 10 ثوان).



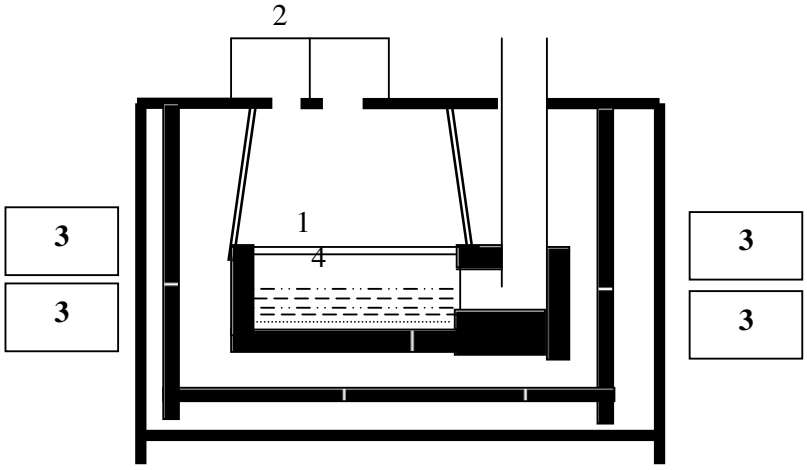
شكل (4–14)
غرفة الانتشار

وتستخدم هذه الغرف، عموما، لتسجيل الجسيمات النووية المشحونة ذات الطاقات العالية. لذلك، يجب أن يكون ضغط الغاز

بداخلها كبيرا جدا، حيث يصل إلى حوالي 20 ضغطا جويا حتى تتوقف هذه الجسيمات ذات الطاقة العالية بداخلها.

9-4 الغرفة الفقاعية The bubble chamber

تم تصميم أول غرفة فقاعية عام 1952. ويقوم عمل هذه الغرفة على استخدام ظاهرة تكوين الفقاعات عند تسخين السوائل تسخينا فائقا ويبين شكل (4 –15) رسما تخطيطيا لغرفة فقاعية. وتملأ الغرفة، عموما، بسائل هيدروجين (أو هليوم أو زينون) عند درجة حرارة تتراوح بين –246° م للهيدروجين، –20°م لسائل الزينون. ويتم تسخين السائل إلى درجة حرارة أعلى من نقطة غليانه، ولكن يبقى السائل في الطور السائل (ولا يتحول إلى بخار)، عن طريق استخدام ضغط خارجي عال جدا (عدة عشرات من الضغط الجوي حسب نوع السائل). وعند خفض الضغط فجأة فإن السائل الفائق التسخين لا يبدأ في الغليان في الحال وإنما تمر فترة معينة دون حدوث الغليان. وعند مرور جسيم مشحون خلال هذه الفترة في الغرفة فإنه يؤدي إلى تأيين السائل، وتنمو فقاعات على هذه الأيونات في خلال زمن مقداره حوالي 10^{-2} ثانية.



شكل (4-15)
الغرفة الفقاعية

1- لوح شفاف　　2- آلة تصوير
3- ملفات مغناطيسية　　4- هيدروجين سائل

وهكذا، تتكون فقاعات على طول مسار الجسيم المشحون ويتم تصوير هذه الفقاعات وسحب الأيونات بواسطة مجال كهربائي وزيادة الضغط من جديد قبل بدء غليان السائل. وتصبح الغرفة جاهزة لتسجيل جسيمات أخرى بعد عدة ثواني قليلة. والزمن الحساس لهذه الغرفة هو عبارة عن الفترة من لحظة خفض الضغط الخارجي على الغرفة إلى لحظة بدء غليان السائل (ويجب ألا يحدث الغليان وذلك بزيادة الضغط إلى قيمته الأولية). ولزيادة الزمن الحساس يجب أن يكون جدار الغرفة الداخلي ناعما تماما وأن يكون السائل نقيا للغاية وإلا انخفض الزمن الحساس إلى حوالي 10^{-3} ثانية.

وتتميز هذه الغرفة عن سابقتها بالآتي:

أ- استخدام سوائل ذات كثافة عالية بدلا من الغازات، وبالتالي يمكن استخدامها لتسجيل الجسيمات النووية ذات الطاقات العالية (عدة آلاف ميغا إلكترون فولت).
ب- قصر زمن إعدادها لدورة القياسات التالية (عدة ثوان).
ج- إمكانية استخدام أبعاد كبيرة للسائل بحيث يقع مدى الجسيم النووي بالكامل داخل السائل.

لذا فإنه يفضل استخدام غرفة الفقاعات عند إجراء الدراسات النووية في مجال الطاقات العالية.

4-10 الكواشف الوميضية The scintillation detectors

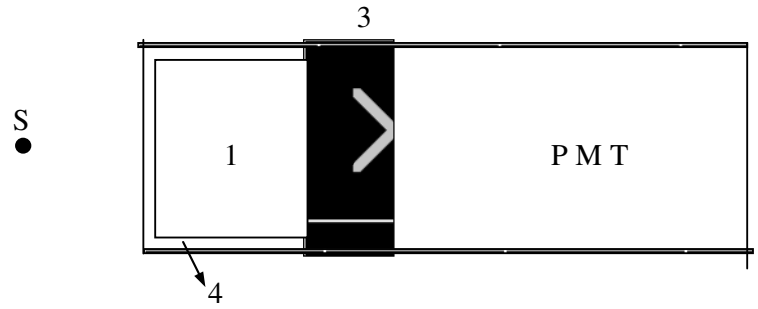
4-10-1 مكونات الكاشف الوميضي

عند سقوط الجسيمات المشحونة أو الإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما على مواد معينة مثل يوديد الصوديوم NaI أو يوديد السيزيوم CsI أو الأنثراسين، أو الاستلبين أو غيرها، ينتج عن ذلك وميض ضوئي. وتعرف هذه المواد باسم المواد الوميضية (scintillators) ولقد استخدمت هذه الظاهرة للكشف عن الإشعاعات المؤينة بجميع أنواعها ولتحديد طاقاتها.

ويتكون الكاشف الوميضي (شكل4-16) من عدة أجزاء أساسية هي: المادة الوميضية وأنبوب توصيل الضوء (light pipe) والعاكس الضوئي (light reflector)، وأنبوب التضاعف الفوتوني (photomultiplier tube) . فعند سقوط الإشعاعات أو الجسيمات النووية على المادة تصدر هذه المادة ومضة ضوئية. وتنتقل الومضة الضوئية عبر أنبوب توصيل الضوء إلى المهبط (الكاثود) الضوئي (potocathode) لأنبوب التضاعف الفوتوني.

أما دور العاكس الضوئي فهو يقوم بعكس الضوء الواقع عليه وإعادته إلى المهبط الضوئي للأنبوب حتى لا يضيع جزء من الضوء الناتج عن الجسيم. وعند سقوط الضوء على المهبط الضوئي تنطلق منه إلكترونات تبعا لظاهرة الانبعاث الكهروضوئي، ثم يتضاعف عدد الإلكترونات تضاعفا فائقا داخل أنبوب التضاعف الفوتوني. وتصل الإلكترونات في النهاية إلى مجمع (أنود) أنبوب التضاعف منتجة بذلك نبضة كهربية على مخرج الأنبوب. وهكذا، يمكن تلخيص عملية الكشف باستخدام الكواشف الوميضية في ستة مراحل مرتبة كالآتي:

1- امتصاص طاقة الجسيم النووي داخل المادة الوميضية مما يؤدي إلى إثارة أو تأين هذه المادة.
2- تحول الطاقة الممتصة في المادة إلى ضوء خلال العملية الوميضية.
3- انتقال الفوتونات الضوئية إلى المهبط الضوئي لأنبوب التضاعف.



شكل (4–16): الكاشف الوميضي

1– المادة الوميضية 2– أنبوب توصيل الضوء
3– الغلاف الخارجي 4– العاكس الضوئي
PMT – أنبوب التضاعف S – المصدر المشع

4– امتصاص المهبط لطاقة الفوتونات الضوئية وانبعاث إلكترونات منه.
5– تضاعف عدد الإلكترونات داخل أنبوب التضاعف الفوتوني.
6– تجميع هذه الإلكترونات عند مصعد الأنبوب وتكوّن شحنة كهربائية كبيرة.

وترتبط الشحنة الكهربية Q المتجمعة على أنود الأنبوب بطاقة الجسيم الساقط E بالعلاقة التالية:

$$Q = eMn_{ph} = e\ MC\ T\ F\ S\ E \qquad (4\text{-}24)$$

حيث e شحنة الإلكترون، M معامل التضاعف في الأنبوب، n_{ph} عدد الإلكترونات الصادر من المهبط الضوئي، C هي كفاءة المادة الوميضية (أي نسبة الفوتونات الضوئية التي تخرج منها إلى الفوتونات المتكونة)، F هي شفافية أنبوب التوصيل، S حساسية المهبط الضوئي (أي عدد الإلكترونات الصادرة منه لكل إلكترون فولت من طاقة الفوتونات الساقطة). وتعتبر جميع المعاملات ثابتة للكاشف الواحد عند الجهد

الواحد. لذلك، يتضح أن الشحنة الكهربية المتكونة على مخرج أنبـــوب التضاعف تتناسب طرديا مع طاقة الجسيم الساقط.

4-10-2 أنواع المواد الوميضية Types of scintillators

يستخدم في الوقت الحالي عدد كبير مـــن المـــواد الوميضـــية. وتختلف خصائص هذه المواد اختلافا كبيرا. ويبين جدول (4-1) بعض أسماء المواد الوميضية شائعة الاستخدام وخصائصها.

ويجب أن تتوفر في المادة الوميضية الجيدة الخصائص التالية:

1- كفاءة عالية في تحويـــل طاقـــة الجســـيم النووي إلى طاقة ضوئية.
2- شفافية تامة للمادة بالنسبة للإشعاعات الصادرة منها.
3- صغر زمن التفكك.

جدول (4-1): خصائص بعض المواد الوميضية

اسم المادة الوميضية	كثافتها ($غم/سم^3$)	طول موجة الضوء المنبعث (انجستروم)	زمن التفكك بالثانية τ
بللورة الأنثراسين (مادة عضوية)	1.25	4400	$10x2.7^{-8}$
بللورة الاستيلبين(مادة عضوية)	1.15	4100	$10x5-3^{-9}$
يوديد صوديوم مزود بالتاليوم NaI(TI)	3.67	4100	$10x2.5^{-7}$
كبريتيد خارصين مزود بالفضةZn S(Ag)	4.10	4500	10^{-5}

وبمجرد دخول الإشعاعات النووية إلى المادة الوميضـــية تثـــار المادة وتبدأ في إصدار الفوتونات الضوئية. ويتغير عدد الفوتونات كدالة من الزمن طبقا للعلاقة التالية:

$$n = n_0 (1- e^{-t})$$

حيث: n عدد الفوتونات الصادرة بعد زمن مقداره t من لحظة دخول الإشعاعات النووية، n_0 العدد الكلي للفوتونات الصادرة. أما τ فهو عبارة عن الزمن اللازم لإصدار $(1-e^{-1})$ من الفوتونات أي 63 % منها. ويعرف هذا الزمن باسم زمن التفكك.

أما الخصائص الأخرى للمادة الوميضية كالكثافة والشكل والحجم وحالة المادة فتختلف باختلاف الغرض من الكاشف والجسيمات النووية وطاقاتها.

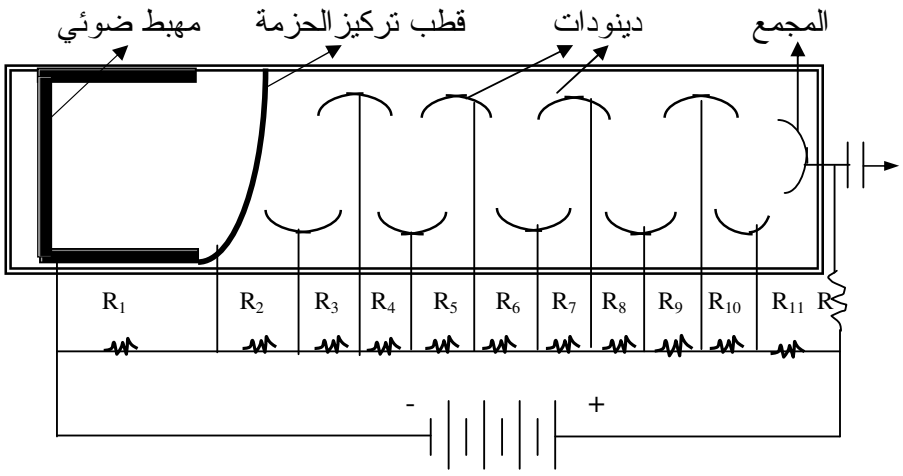
وتوضع المادة الوميضية عادة داخل حافظة محكمة القفل، وذلك لحمايتها من الصدمات ومنع وصول الضوء إليها ومنعها من التميع بواسطة الرطوبة الجوية. وتغطى المادة الوميضية (من جميع الجوانب عدا الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي) بطبقة رقيقة من أكسيد المغنيسيوم (MgO) تعمل كعاكس للضوء. أما الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي فيغطى بطبقة متجانسة السمك من الزجاج النقي، وذلك لوصول الضوء إلى المهبط الضوئي. وعند استخدام المادة الوميضية للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة أو جسيمات بيتا يجب عمل نافذة في الحافظة من ورقة رقيقة من الألمونيوم، وذلك لمنع وصول الضوء من الخارج، وفي الوقت نفسه للسماح بمرور هذه الجسيمات.

4-10-3 أنبوب التضاعف الفوتوني

The photomultiplier tubs (PMT)

أنبوب التضاعف الفوتوني عبارة عن أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء تفريغا جيدا ويحتوي على أربعة عناصر رئيسة هي المهبط (الكاثود) الضوئي، وقطب تركيز الحزمة الإلكترونية، ومجوعة أقطاب تعرف بالدينودات (dynodes) ، والقطب المجمع (الأنود). ويبين شكل (4-17) رسما تخطيطيا لأنبوب التضاعف الفوتوني. ويقوم المهبط بإصدار إلكترونات عندما يسقط الضوء المنبعث من المادة الوميضية (ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي). لذلك، يصنع المهبط من مادة شبه شفافة مغطاة من الداخل بطبقة رقيقة من مادة كهروضوئية. وعند انطلاق الإلكترونات من المهبط يتم توجيهها وتركيزها بواسطة قطب

تركيز الحزمة الإلكترونية الذي يعمل كعدسة مجمعة بحيث تصل الإلكترونات الخارجة من المهبط إلى الدينود الأول. وتقوم الدينودات بمضاعفة عدد الإلكترونات. فعند سقوط إلكترون بطاقة كبيرة (عدة عشرات إلكترون فولت) فإن ذلك يؤدي إلى انبعاث ثانوي من الدينود. وبذلك، يتضاعف عدد الإلكترونات على الدينود الأول ويتجه هذا العدد المتضاعف إلى الدينود الثاني. فإذا كانت طاقة الإلكترونات عند وصولها للدينود الثاني كبيرة يحدث الانبعاث الثانوي عليه ويتضاعف عددها من جديد. وهكذا، تستمر عملية التضاعف على كل دينود. وفي النهاية يتم تجميع هذا العدد الهائل من الإلكترونات بعد التضاعف على المجمع (الأنود) فتظهر عليه نبضة كهربية سالبة (لأن شحنة الإلكترونات سالبة). ولكي تتحرك الإلكترونات الصادرة من المهبط الضوئي إلى الدينود الأول، فالثاني، فالثالث، ...، فالمجمع فإنه يجب أن يتزايد الجهد الموجب لهذه الأقطاب بالتتابع. ويتم تحقيق ذلك باستخدام منبع جهد عال V ومقسم للجهد مكون من عدة مقاومات (من R_1 إلى R_{11}على الشكل) بحيث يكون جهد المجمع مساويا لقيمة V ثم يتناقص الجهد بالتدريج إلى أن يصبح مساويا للصفر على المهبط. (تجدر الإشارة إلى أنه يمكن



شكل (4-17): أنبوب التضاعف الفوتوني

تحقيق النتيجة نفسها إذا كان جهد المجمع مساويا للصفر ثم يتناقص الجهد حتى يصبح مساويا (V-) على المهبط. أي أنه يتم تغذية المهبط بمنبع جهد سالب بدلا من تغذية المجمع بمنبع جهد موجب).

وهكذا، ينتج تضاعف عدد الإلكترونات على الدينودات بسبب ظاهرة الانبعاث الثانوي. فإذا كان معامل الانبعاث الثانوي على الدينود الأول δ_1 وعلى الثاني δ_2 وعلى الأخير δ_n يكون معامل التضاعف الكلي لأنبوب هو:

$$M = \delta_1 \ \delta_2 \ldots\ldots\ldots \delta_n \qquad (4\text{-}26)$$

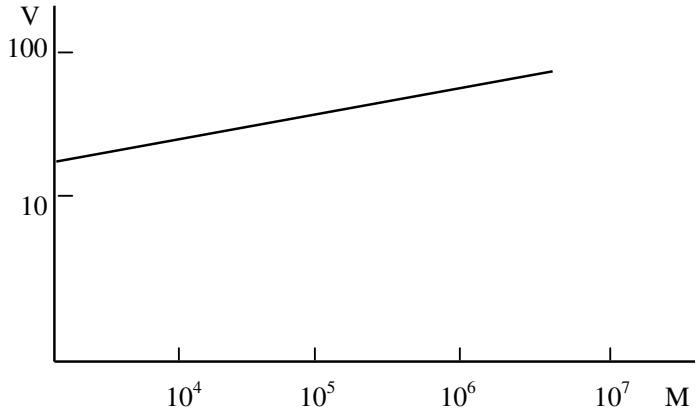
علما بأن معامل الانبعاث الثانوي للدينود هو نسبة عدد الإلكترونات الصادرة منه إلى عدد الإلكترونات الساقطة عليه. فإذا كان عدد الدينودات في الأنبوب عشرة وكان معامل التضاعف المطلوب هو 10^6 فيجب أن يكون معامل الانبعاث الثانوي علىكل دينود في حدود 3.95 أي أن :

$$\delta_1 = \delta_2 = \ldots \delta_n = 3.95$$

ويعتمد معامل الانبعاث الثانوي δ كل دينود على طاقة الإلكترونات الساقطة عليه، حيث يزداد بزيادة الطاقة. ولما كانت الطاقة التي تكسبها الإلكترونات عند التحرك من دينود إلى آخر تتناسب طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين، فإن معامل الانبعاث يتناسب بالتالي طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين. لذا فإن معامل التضاعف في أنبوب التضاعف الفوتوني يعتمد اعتمادا كبيرا على مقدار الجهد V . ويوضح شكل (4–18) كيفية تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهد في العديد من أنابيب التضاعف. وعموما، فإنه يمكن التعبير عن معامل التضاعف رياضيا بالعلاقة التالية عند ثبوت عدد الدينودات:

$$M = K E^I$$

حيث: K ثابت يعتمد على نوع الأنبوب، E شدة المجال الكهربائي بين كل دينودين، I عدد يساوي 5 تقريبا.



شكل (4-18)
تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهد في أنبوب التضاعف الفوتوني

وهكذا، يلاحظ أن أنبوب التضاعف الفوتوني يؤدي إلى تكبير النبضة الكهربائية الناتجة عن الجسيم النووي في حدود تتراوح بين حوالي 10^3 ، 10^7 مرة تبعا لقيمة الجهد المستخدم لتغذية الأنبوب. وتعتبر هذه القيمة العالية لمعامل التكبير (التضاعف) من أهم مزايا الكواشف الوميضية بالمقارنة بالكواشف الغازية حيث يمكن الاستغناء عن المكبرات (المضخمات) الإلكترونية المستخدمة مع غرف التأين والعداد التناسبي أو استخدام مكبرات ذات معامل منخفض للتكبير.

4-10-4 القدرة التحليلية للطاقة الزمن للكواشف الوميضية
Energy and time resolution of the scintillation detectors

عند ثبوت الجهد في أنبوب التضاعف عند قيمة معينة تكون قيمة معامل التضاعف ثابتة. وعندئذ يجب أن يتناسب اتساع نبضة التيار (أي القيمة القصوى للتيار) مع طاقة الجسيم النووي تناسبا طرديا. ومع ذلك فإنه يلاحظ أن اتساع نبضة التيار الناتجة عن الأنود تختلف اختلافا

طفيفا للجسيمات نفسها ذات الطاقة الواحدة. ويرجع هذا الاختلاف الطفيف في القيمة القصوى للتيار وبالتالي في القيمة القصوى لجهد النبضة إلى الآتي:

1- اختلاف عدد الفوتونات التي تصل للمهبط الضوئي من المادة الوميضية بسبب امتصاص بعضها في المادة .

2- اختلاف التضاعف داخل الأنبوب اختلافا طفيفا وخاصة على الدينود الأول وذلك لأن معامل الانبعاث الثانوي يعتمد على زاوية سقوط الإلكترون على الدينود فضلا عن أن عملية الانبعاث الثانوي تعتبر عملية إحصائية بحتة.

لذلك، فإنه عند الكشف عن جسيمات ذات طاقة واحدة E يحدث توزع في طاقتها مقداره ΔE ، ويمكن إيجاد القدرة التحليلية r للكاشف الوميضي بالأسلوب نفسه المتبع للكواشف الأخرى، وهي:

$$r = (\Delta E / E) \times 100\ \%$$

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة القدرة التحليلية يعني انخفاض قيمة r . فمثلا، إذا كانت $r = 0.25\ \%$ فيقال أن هذا الجهاز ذو قدرة تحليلية عالية، وأما إذا كانت $r = 2.5\ \%$ فيقال أن الجهاز ذو قدرة تحليلية أقل. ويمكن زيادة القدرة التحليلية للكواشف الوميضية وذلك باستخدام مادة وميضية عالية الشفافية، وتوجيه عناية خاصة إلى أنبوب توصيل الضوء، وعدم ترك أي فقاعات هوائية بين المادة الوميضية وأنبوب التوصيل الضوئي أو بين هذا الأنبوب وأنبوب التضاعف الفوتوني، حتى لا يتشتت الضوء على هذه الفقاعات، مما يؤدي إلى حدوث توزع كبير في عدد الفوتونات التي تصل المهبط. كذلك، فإنه لتقليل التوزع الناتج عن أنبوب التضاعف الفوتوني، وبالتالي لرفع تركيز الإلكترونات وزيادة حساسية المهبط الضوئي وزيادة معامل التضاعف لكل دينود على حدة، وخاصة الدينود الأول، حيث يكون عدد الإلكترونات ما زال قليلا وإمكانية التوزع كبيرة. لذلك، فإنه يفضل استخدام الجهود العالية التي

تحقق معامل تضاعف كبير، بشرط ألا يتجاوز الجهد المطبق الحد الأقصى للجهد المسموح به على الأنبوب المعين لتلاشي حدوث شرارة كهربية بين الدينودات، وبالتالي لتلاشي تلف الأنبوب كله. كذلك، فإنه يفضل أن يكون فرق الجهد بين الدينود الأول وماقبله أعلى بعدة مرات من فرق الجهد بين أي دينودين تاليين.

وتتراوح القدرة التحليلية، عموما، للكواشف الوميضية بين 2 %، 20 % وذلك تبعا لحجم المادة الوميضية، حيث تنخفض القدرة التحليلية للطاقة بزيادة حجم البلورة (المادة الوميضية).

أما القدرة التحليلية الزمنية (time resolution) فهي عبارة عن الفاصل الزمني بين جسيمين متتابعين بحيث يسجلان منفصلين عن بعضهما البعض زمنيا. وأهم العوامل التي تحدد القدرة التحليلية الزمنية للكواشف الوميضية هي زمن التفكك للمادة الوميضية وزمن التأخير الناتج عن انتقال الإلكترونات في أنبوب التضاعف الفوتوني. ويتراوح هذا الزمن الأخير بين 10^{-8} ، 10^{-7} ثانية تبعا لنوع وحجم الأنبوب والجهد المستخدم حيث يتناسب هذا الزمن عكسيا مع الجذر التربيعي للجهد المستخدم .

كذلك، تجدر الإشارة إلى أنه يحدث اختلاف في زمن الانتقال، وذلك بسبب مرور الإلكترونات في مسارات مختلفة عند انتقالها بين الدينودات، إلا أن هذا الاختلاف لا يتجاوز عادة 7×10^{-10} ثانية.

4-10-5 استخدام الكواشف الوميضية

تستخدم الكواشف الوميضية للكشف عن جميع أنواع الإشعاعات المؤينة وتسجيلها بالأسلوب النبضي وتحديد طاقاتها. ولهذا الغرض يستخدم كاشف وميضي مكون من مادة وميضية مناسبة للنوع المعين من الإشعاعات وأنبوب تضاعف فوتوني. ويوصل مخرج الأنبوب وهو المجمع (الأنود)، أو الدينود الأخير السابق مباشرة للمجمع بدارة إلكترونية تعرف باسم التابع الباعثي أو المكبر الأولي (preamplifier).

ويجب تجميع هذه الدارة على قاعدة الأنبوب مباشرة لمنع فقد نسبة من التيار عند سحبه لمسيفات بعيدة. كذلك، يتم تجميع دارة مقسم الجهد (potential - divider) ، اللازم لتوزيع الجهد على الدينودات المختلفة على هذه القاعدة نفسها. وتؤخذ نبضات الجهد الخارجة من التابع الباعثي أو المكبر الأولي لعد عددها أو لتحليل طاقاتها في أجهزة أخرى. ويتم تغذية أنبوب التضاعف بمنبع جهد عال ذي استقرارية عالية.

وتجدر الإشارة إلى أنه يؤخذ أحيانا مخرجان من أنبوب التضاعف، الأول من المجمع (الأنود)، ويكون تياره سالبا نظرا لأنه ناتج عن وصول الإلكترونات السالبة للمجمع. ويؤخذ المخرج الآخر من أحد الدينودات الأخيرة ويكون تياره موجبا نظرا لأنه ناتج عن خروج عدد من الإلكترونات من هذا الدينود أكبر من العدد الذي يصله من الدينود السابق له. ويكون عادة جهد النبضة الموجبة من الدينود أصغر من جهد النبضة السالبة من المجمع.

أ- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى بواسطة الكواشف الوميضية يفضل استخدام بلورة وميضية من كبريتيد الخارصين المنشط بالفضة ZnS(Ag) . وتتميز هذه البلورة بكفاءة عالية لتحويل طاقة جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى إلى طاقة ضوئية. ومن الجانب الآخر فإن أهم عيوب هذه البلورة هو ضعف شفافيتها. إلا أنه نظرا لصغر مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة فإنه يستخدم سمك صغير من هذه المادة (حوالي 1 مم) مما يجعل ضعف الشفافية غير ذي أهمية. ويمكن ترسيب مادة كبريتيد الخارصين مباشرة على زجاج أنبوب التضاعف الفوتوني، دون الحاجة لأنبوب توصيل الضوء.

ب- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن إشعاعات جاما والإشعاعات السينية

للكشف عن إشعاعات جاما أو الأشعة السينية باستخدام الكواشف الوميضية تستخدم، عموما، بلورة يوديد الصوديوم المنشطة بالثاليوم NaI(Tl) كمادة وميضية. ويفضل استخدام هذا النوع من البلورات مع الأشعة السينية وإشعاعات جاما بسبب كفاءتها العالية نظرا لكبر كثافتها وكبر العدد الذري للثاليوم واليود. وتعتمد كفاء الكاشف على كل من سمك البلورة وطاقة الإشعاعات. فعند الطاقة المعينة تزداد الكفاءة كلما زاد سمك البلورة. وأما بالنسبة للسمك المعين فتقل الكفاءة بالنسبة لكل من الأثر الكهروضوئي وأثر كومبتون بزيادة الطاقة وتزداد الكفاءة بالنسبة لإنتاج الأزواج كلما زادت الطاقة (راجع الفصل الثالث). وعموما، فإن كفاءة الكواشف الوميضية بالنسبة لإشعاعات جاما تعتبر أعلى من كفاءة العدادات الغازية لهذا النوع من الإشعاعات بحوالي عدة عشرات أو حتى عدة مئات من المرات.

ج- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات بيتا

على الرغم من أن جميع أنوع المواد الوميضية تعتبر حساسة بالنسبة لجسيمات بيتا بدرجات متفاوتة، إلا أنه يفضل دائما استخدام المواد الوميضية العضوية للكشف عن هذه الجسيمات. ويرجع السبب في ذلك إلى الآتي:

1- صعوبة استخدام بلورة يوديد الصوديوم المنشطة بالثاليوم NaI(Tl) للكشف عن الإلكترونات نظرا لضرورة عزل هذه البلورة عن الهواء الجوي بواسطة حافظة محكمة القفل حتى لا تتميع، وبالتالي صعوبة عمل النافذة.

2- يعتبر الوزن الذري الكبير لبلورة يوديد الصوديوم من أهم عيوبها بالنسبة للكشف عن جسيمات بيتا حيث ينتج عنه نسبة عالية من تشتت هذه الجسيمات للخلف (backscattering) في مادة البلورة.

د- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن النيوترونات

يوجد في الوقت الحالي عدة مواد وميضية للكشف عن النيوترونات. ويتم الكشف عنها خلال الجسيمات المشحونة الناتجة عن تفاعل النيوترونات مع المادة الوميضية. وبالنسبة للنيوترونات الحرارية تستخدم أي من مادتي الليثيوم Li أو البور B ، حيث تتفاعل النيوترونات الحرارية مع أي من هاتين المادتين مع انبعاث جسيمات ألفا بطاقة كبيرة. كما أن المقطع العرضي لهذه التفاعلات يعتبر كبيرا، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الكاشف.

لذلك، تستخدم عادة بلورة يوديد الليثيوم المنشطة بالثاليوم LiI(Tl) للكشف عن النيوترونات الحرارية. وتتميز هذه البلورة بخواص مشابهة لخواص بلورة يوديد الصوديوم. وفي بعض الكواشف النيوترونية الأخرى تستخدم بلورة مكونة من خليط من مركبات الليثيوم أو البور مع كبريتيد الخارصين.

أما بالنسبة للنيوترونات السريعة فإنه يفضل الكشف عنها باستخدام البروتونات المرتدة عند تشتت هذه النيوترونات على الهيدروجين. ولهذا الغرض تجهز البلورة في شكل خليط من حبيبات كبريتيد الخارصين ZnS والشمع لاحتوائه على نسبة عالية من الهيدروجين. وتعتبر هذه البلورة من أنسب البلورات للكشف عن النيوترونات السريعة.

وتوجد عدة أنواع من كواشف النيوترونات السريعة التي تعتمد أساسا في عملها على التفاعل (n , γ) . ويستخدم لهذا الغرض عدة مواد ذات مقاطع عرضية عالية لهذا النوع من التفاعل مثل الإنديوم والذهب حيث تحدث بينها وبين النيوترونات السريعة التفاعلات التالية:

$$^{115}_{49}In + n \longrightarrow {}^{116}_{49}In + \gamma$$

$$^{197}_{79}Au + n \longrightarrow {}^{198}_{79}Au + \gamma$$

وتعتبر المواد الناتجة عن التفاعل وهي الإنديوم ^{116}In والذهب ^{198}Au مصادر مشعة لجسيمات بيتا. وبقياس النشاط الإشعاعي لهذه المصادر يمكن الكشف عن النيوترونات السريعة وتحديد عددها.

4-11 الكواشف شبه الموصلة
The semiconductor (solid state) detectors

حدث في السنوات الأخيرة تحول كبير من الكواشف الغازية والوميضية إلى الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات خاصة في مجال البحوث النووية عند الطاقات المنخفضة. ويرجع السبب في ذلك إلى المزايا العديدة التي تتمتع بها الكواشف شبه الموصلة التي سيرد ذكرها. وهناك تشابه كبير بين عمل الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات وعمل غرفة التأين. ففي غرفة التأين تؤين الإشعاعات جزيئات الغاز مكونة بذلك أزواجا إلكترونية أيونية، يتم تجميعها والحصول بالتالي على نبضة جهد كهربائية. أما في الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات فتؤين الإشعاعات ذرات المادة الصلبة شبه الموصلة مثل السليكون أو الجرمانيوم، مكونة بذلك أزواجا إلكترونية – ثقبية، يمكن تجميعها والحصول عليها ، بالتالي، منها على نبضة كهربائية. وتبلغ القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – ثقبي في مادة السيليكون أو الجرمانيوم حوالي 3 إلكترون فولت، (في حين أن هذه القيمة حوالي 35 إ.ف في الهواء). لذلك، فإن الشحنة المتكونة عن الجسيم النووي نفسه في السيليكون أو الجرمانيوم تبلغ تقريبا عشرة أضعاف الشحنة المتكونة في الهواء مما يؤدي بدوره إلى قدرة تحليلية فائقة للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات، وبالتالي إلى دقة تحديد طاقة الجسيمات النووية. ونظرا لأن مدى الجسيمات النووية في المواد الصلبة أقل بكثير منه في الغازات فإنه يمكن استخدام كواشف من مواد صلبة بأعماق صغيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى صغر الزمن اللازم لتجميع الشحنات الكهربائية، وبالتالي إلى قدرة تحليلية زمنية عالية بالنسبة لهذا النوع من الكواشف.

4-11-1 ثنائي الملتقى الثقبي الإلكتروني
The P-N junction diode

تتميز ذرات المواد رباعية التكافؤ مثل السيليكون والجرمانيوم بوجود أربعة إلكترونات في المدار الخارجي. وعندما تكون مادة

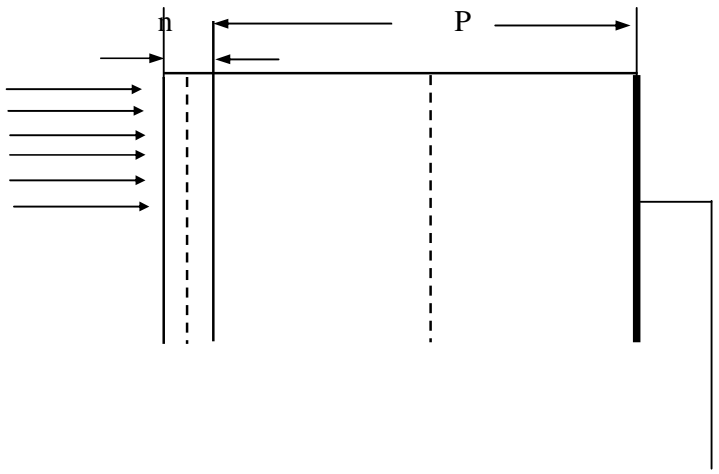
السيليكون أو الجرمانيوم في حالة متبلورة تنتظم ذرات المادة في نظام هندسي بحيث ترتبط كل ذرة مع أربع ذرات متجاورة بواسطة إلكترونات التكافؤ الأربعة. لذلك، فإنه عند درجة حرارة الصفر المطلق يكون كل إلكترون من إلكترونات التكافؤ الأربعة مرتبطا في الوقت نفسه بذرتين، هما الذرة الأم والذرة المجاورة. ولا توجد، بذلك، أية إلكترونات حرة في المادة. لذلك تكون المادة عازلة تماما. ولتحرير أحد الإلكترونات الأربعة المرتبطة بالذرتين في البلورة يجب منحه طاقة تصل إلى حوالي 0.72 إ.ف في حالة الجرمانيوم وحوالي 1.12 إ.ف في حالة السليكون. وعند وجود البلورة في درجة حرارة الغرفة أي 25 ْم (298 ْ كلفين) تكتسب بعض إلكترونات التكافؤ في المادة هذه القيمة المطلوبة من الطاقة، فتتحرر هذه الإلكترونات وتصبح حرة تاركة في مكانها ثقبا موجبا. وهكذا، يتكون زوج إلكتروني _ثقبي يؤدي إلى التوصيل الكهربائي للمادة. ولكن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية في المادة يكون قليلا للغاية ولا يتجاوز زوجا واحدا لكل 10^{11} ذرة للجرمانيوم وزوجا واحدا لكل 10^{13} ذرة سليكون. لذلك، تكون التوصيلة الكهربائية للمادة النقية شبه الموصلة صغير، أي أن مقاومتها تكون عالية. وتجدر الإشارة إلى أن مقاومة السليكون تكون أعلى عادة بحوالي مائة مرة من مقاومة الجرمانيوم، عند درجة حرارة الغرفة نظرا لأن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتكونة في حالة السليكون تكون أقل منها في حالة الجرمانيوم. وتسمى الأزواج الناتجة عن المادة النقية بحاملات الشحنة الذاتية.

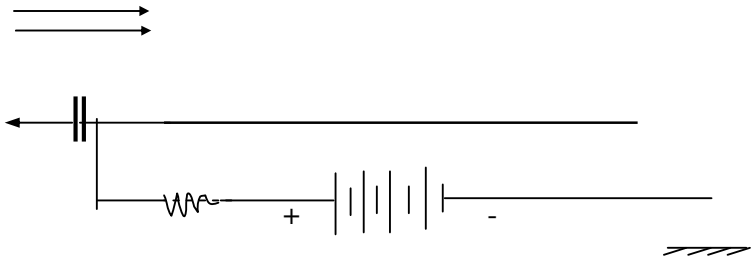
ولزيادة عدد الحاملات الحرة وبالتالي زيادة توصيلية البلورة يمكن إضافة نسبة صغيرة للغاية من شوائب خماسية التكافؤ إلى مادة السليكون أو الجرمانيوم النقي. فعند إضافة نسبة من ذرات خماسية التكافؤ مثل الفسفور P (أو الزرنيخ As) إلى السليكون (أو الجرمانيوم) النقي ترتبط ذرة الفسفور (أو الزرنيخ) في البلورة بأربعة إلكترونات مع أربع من ذرات السليكون مكونة بذلك الروابط التساهمية الأربعة المطلوبة، ويبقى الإلكترون الخامس غير مرتبط مع أية ذرة فيصبح إلكترونا حرا ويشترك في التوصيل الكهربائي. وتعرف الذرات خماسية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات الواهبة (doner) ، حيث أنها وهبت

إلكترونا حرا للبلورة. وتسمى المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة الإلكترونية (n-type-material) لأن الإلكترونات تكون هي الحاملات الغالبية للشحنة، أما الثقوب فلا يوجد منها إلا الذاتية وتعرف عندئذ بالحاملات الأقلية.

كذلك، يمكن زيادة التوصيل الكهربائي للمادة وذلك بغرس شوائب من مواد ثلاثية التكافؤ كالبور B أو الجاليوم Ga. فعند تكوّن البلورة ذات الشوائب ترتبط ذرة البور بإلكتروناتها التكافؤية الثلاثة مع ثلاث ذرات سليكون مجاورة مكونة بذلك ثلاث روابط تساهمية. ولتكوين الرابطة الرابعة تستأثر ذرة البور بأحد الإلكترونات من إحدى ذرات السليكون المجاورة. وبذلك، يتكون في ذرة السليكون المجاورة ثقب موجب الشحنة. وتسمى ذرات المادة الثلاثية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات المتقبلة (acceptor) حيث أنها تستقبل إلكترونا من كل ذرة مجاورة مكونة بذلك ثقب. وتعرف المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة ثقبية التوصيل (p-type material) حيث أن الثقوب تمثل الحاملات الغالبية في هذه المادة، أما الإلكترونات فلا يوجد منها إلا الذاتية وهي بذلك تمثل الحاملات الأقلية.

وتضاف الشوائب عموما بنسب صغيرة جدا (حوالي ذرة واحدة لكل مليون ذرة سليكون أو جرمانيوم نقي). وعند إضافة الشوائب الخماسية إلى جزء من المادة النقية والشوائب الثلاثية إلى الجزء الآخر من نفس القطعة من المادة النقية يتكون ما يعرف باسم ثنائي الوصلة أو ثنائي الملتقى (The P-N junction diode) كالمبين في شكل (4-19). وعند الملتقى تنتقل إلكترونات التوصيل الحرة من المادة الإلكترونية إلى المادة الثقبية (بظاهرة الانتشار) تاركة خلفها الأيونات الموجبة. كما تنتقل الثقوب الموجبة (بالظاهرة نفسها) من المنطقة الثقبية إلى المنطقة





شكل (4-19)
ثنائي الوصلة (الكواشف شبه الموصلة)

الإلكترونية، تاركة خلفها الأيونات السالبة. وبذلك، تتكون على جانبي الملتقى منطقة تعرف باسم منطقة الاستنفاد (The depletion layer) تكون خالية تماما من الشحنات الكهربائية الحرة (سواء الإلكترونات أو الثقوب). وتعتبر هذه المنطقة عازلة تماما ويتكون فيها مجال كهربائي شدته E ناتج عن الأيونات الموجب والسالبة غير القابلة للحركة لارتباط كل منها بأربعة روابط تساهمية مع أربعة ذرات مجاورة. وفي حالة عدم توصيل جهد كهربائي بطرفي الثنائي يتراوح عرض منطقة الملتقى بين 10^{-3}، 10^{-5} سم، وذلك تبعا لنسب تركيز الشوائب. فكلما زاد تركيز الشوائب قل العرض والعكس صحيح. وعند توصيل جهد مباشر (أي القطب الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونية) بين طرفي الثنائي يقل عرض هذه المنطقة ويصبح مساويا للصفر عند حوالي 0.5 فولت، ويمر عندئذ، تيار كبير يعرف بالتيار المباشر. أما عند توصيل جهد عكسي بطرفي الثنائي (أي عكس اتجاه القطبية) يزداد عرض هذه المنطقة. ويمر تيار صغير جدا يعرف بالتيار العكسي للثنائي. ولا يعتمد التيار العكسي على قيمة الجهد العكسي وإنما تكون قيمته ثابتة (طالما كان الجهد العكسي أعلى من حوالي 0.5 فولت)، وإنما يعتمد التيار العكسي على درجة الحرارة، حيث أنه ناتج عن الإلكترونات والثقوب الذاتية الناتجة عن المادة شبه الموصلة النقية. لذلك، يكون التيار العكسي في حالة الجرمانيوم أعلى بكثير منه في حالة السليكون. ويتم توصيل الجهد المباشر، كما ذكر، بتوصيل القطب

الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونيـــة، أما الجهد العكسي، فهو كالمبين في شكل (4–19) حيث يوصل القطـــب الموجب بالمادة الإلكترونية والقطب السالب بالمادة الثقبية.

4–11–2 كواشف السليكون The silicon detectors

كاشف السليكون عبارة عن ثنائي ملتقى ثقبي إلكتروني. ويكـــون عرض المادة الإلكترونية أقل من 1 ميكرومتر حتى لا تفقد الإشـــعاعات الساقطة جزءا كبيرا من طاقاتها فيه. ونظرا لصـــغر عـــرض المـــادة الإلكترونية يجب أن يكون تركيز الشوائب الخماسية فيها عاليـــا. وأمـــا المادة الثقبية فيمكن أن تمتد لعمق يصل إلى عدة ملليمتـــرات. ويمكـــن إيجاد عرض منطقة الملتقى d عند تحييز الكاشف بجهـــد عكســـي (أي توصيله بجهد عكسي) من العلاقة التالية:

$$d = d_n + d_p \qquad (4\text{-}28)$$

حيث:

$$d_p = \varepsilon (V)^{1/2} / 2\pi e N_P \quad , \quad d_n = \varepsilon (V)^{1/2} / 2\pi e N_n$$

وحيث: V هي جهد التحييز العكسي، ε ثابت العـــزل للمـــادة، e شحنة الإلكترون أو الثقب، N_n هي كثافة الإلكترونـــات فـــي المنطقـــة الإلكترونية (أي عدد الإلكترونات الحرة لوحدة الحجم)، N_p هي كثافـــة الثقوب في المنطقة الثقبية.

وتعتبر منطقة الاستنفاد هي المنطقة الحساسة للكاشف. ويتناسب عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية الناتج في هذه المنطقـــة عـــن الجســـيم النووي الساقط تناسبا طرديا مع الطاقة التي يفقدها هذا الجسيم في هـــذه المنطقة. ويتم سحب هذه الأزواج وتجميعها تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، حيث تتجه الإلكترونات الناتجة إلى المنطقة الإلكترونية وتتجه الثقوب إلى المنطقة الثقبية، مما يؤدي إلى مرور تيار كهربـــائي وظهور نبضة كهربائية على مخرج الكاشف.

وفي حالة اجتياز الجسيم النووي لمنطقة الاستنفاد ودخوله إلى المنطقة الثقبية فإنه يولد، كذلك، أزواجا إلكترونية ثقبية في هذه المنطقة. إلا أن هذه المنطقة لا تحتوي إلا على عدد قليل جدا من الإلكترونات الحرة وعدد كبير جدا من الثقوب. لذلك، تتحرك الثقوب كعادتها في هذه المنطقة ولكن الإلكترونات المتولدة يمكن أن تعيد اتحادها مع العدد الكبير من الثقوب فيضيع جزء كبير من التيار. وبالتالي لا تتناسب الشحنة المتجمعة مع الطاقة التي يفقدها الجسيم في هذه المنطقة. كذلك الأمر بالنسبة للمنطقة الإلكترونية. فعند مرور الجسيم النووي بها تتولد الأزواج الإلكترونية الثقبية. ولما كانت الثقوب في هذه المنطقة عبارة عن أقلية والإلكترونات هي الغالبية فإنه يمكن أن تعيد الثقوب المتكونة اتحادها مع الإلكترونات، وبالتالي يُفقد عدد كبير من هذه الثقوب ويضيع جزء من التيار. لذلك، يجب أن يكون عرض المنطقة الإلكترونية صغيرا للغاية، وأن يكون عرض منطقة الاستنفاد كافيا بحيث يتوقف الجسيم النووي قبل الوصول إلى نهايتها، وذلك للمحافظة على التناسب بين طاقة الجسيم النووي وعدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتجمعة، أي بين طاقة الجسيم والنبضة الكهربائية الناتجة على مخرج الكاشف.

ويعتمد الزمن اللازم لتجميع الأزواج الإلكترونية الثقبية على عدة عوامل، مثل عرض منطقة الاستنفاد وبالتالي على الجهد العكسي، وعلى كثافة الشوائب. وتتحرك كل من الثقوب والإلكترونات تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، وكذلك بفعل الحركة الحرارية العشوائية. فالسرعة الانسياقية تحت تأثير المجال E عبارة عن:

$$v = \mu\mu E$$

وهي تختلف لكل من الثقوب والإلكترونات لاختلاف الحركية μ لكل منهما. والسرعةالانسياقية لأي من الثقوب والإلكترونات v لا تتعدى 10^{7} سم/ثانية مهما زاد الجهد. فإذا كان عرض منطقة الاستنفاد حوالي 0.1 سم فإن الزمن اللازم لتجميع الشحنة هو 10^{-8} ثانية، وهذا هو الحد الأدنى لزمن تجميع الشحنة. وعموما، يتوقف زمن نمو التيار من الصفر إلى أقصى قيمة له على عدة عوامل مثل السعة الداخلية للثنائي

(للكاشف) ومقاومته الداخلية. ويتراوح هذا الزمن الأخير بين 3×10^{-9} إلى 10^{-7} ثانية للكواشف شبه الموصلة المختلفة.

ويستخدم هذا النوع من الكواشف المجهز أساسا من مادة السليكون للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة كالبروتونات وجسيمات ألفا. وعموما، لا تستخدم مادة الجرمانيوم في هذا النوع من الكواشف نظرا لأن مقدار التيار العكسي الناتج عن الحاملات الأقلية في الجرمانيوم كبير ويقترب من التيار الناتج عن الجسيم النووي. وعند استعمال الجرمانيوم في تجهيز مثل هذه الكواشف فإنه يجب خفض حرارته إلى حوالي 77° كلفين (أي حوالي 196 تحت الصفر المئوي) حتى لا يتكون عدد كبير من الحاملات الذاتية، وبالتالي حتى يمكن إهمال قيمة التيار العكسي بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي.

4-11-3 كواشف الجرمانيوم – ليثيوم

Germanium -lithium detectors

للكشف عن جسيمات بيتا وإشعاعات جاما فإنه يفضل استخدام مادة الجرمانيوم نظرا لكثافتها العالية وكبر عددها الذري. كذلك، يجب أن يكون عرض المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) كبير نسبيا (من 1-3مم) حتى تتوقف خلالها جسيمات بيتا أو الإلكترونات الناتجة عن الأثر الكهروضوئي لإشعاعات جاما. ولهذا الغرض يتم غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم، وذلك لزيادة مقاومة المادة شبه الموصلة. فعند غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم من النوع الثقبي يقل عدد الثقوب الغالبية فيها، وبذلك تصبح توصيليتها قريبة من توصيلية المادة النقية، مما يؤدي بدوره إلى زيادة عرض منطقة الاستنفاد حتى عند الجهود العكسية الصغيرة. ويتم غرس ذرات الليثيوم بطرق تكنولوجية مختلفة باستخدام جهود معينة ودرجات حرارة محددة لفترات زمنية طويلة (حوالي عشرة أيام متصلة لإعداد 2 سم من الجرمانيوم المغروس بالليثيوم).

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة حجم المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) تؤدي بالتالي إلى زيادة التيار العكسي. وحيث أن هذا التيار

يعتمد أساسا على درجة حرارة المادة شبه الموصلة فإنه يجب خفض قيمتها، وذلك بتبريد كاشف الجرمانيوم حتى درجات حرارة منخفضة (حوالي -196 ْم). بالإضافة إلى ذلك، فإنه عند ترك الجرمانيوم المغروس بالليثيوم عند درجة حرارة الغرفة، فإنه حتى في حالة عدم توصيل الجهد العكسي إليه يمكن أن يحدث انسياق لذرات الليثيوم فتتحرك نحو السطح. وبالتالي، تفقد هذه الذرات من الجرمانيوم بفعل حركنها الحرارية ويتلف الكاشف في الحال. وتعتبر هذه المشكلة في غاية الخطورة بالنسبة للكواشف المجهزة من الجرمانيوم عنها بالنسبة لتلك المجهزة من السليكون. ولهذا يجب المحافظة على الكاشف باستمرار تحت درجة حرارة منخفضة (196م تحت الصفر) أي تحت تأثير حرارة النيتروجين السائل. كذلك، فإنه من المفضل الإبقاء على الكاشف تحت تأثير جهد عكسي مع التبريد بشرط ألا يتغير هذا الجهد العكسي تغيرا مفاجئا بالزيادة أو النقص.

4-11-4 كواشف الجرمانيوم عالية النقاء

The hyper pure germanium detector

بسبب سرعة تلف كواشف الجرمانيوم ليثيوم بمجرد نفاذ النيتروجين السائل من وارتفاع درجة حرارته قرب درجة حرارة الغرفة وبعد أن تمكن العلماء من تحضير أحجام مختلفة من بلورات الجرمانيوم عالية النقاء وبالتالي من زيادة مقاومة الجرمانيوم المحيز عكسيا لخفض التيار العكسي، حلت كواشف الجرمانيوم عالية النقاء محل كواشف الجرمانيوم ليثيوم. ولم تعد درجة الحرارة المنخفضة (أي درجة حرارة النيتروجين السائل) مطلوبة إلا قبل توصيل جهد التحييز العكسي للكاشف. أي قبل تشغيل الكاشف بعدد محدود من الساعات.

4-11-5 أهم مزايا الكواشف شبه الموصلة

تتميز الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الغازية والوميضية بعدة مزايا أهمها ما يلي:

أ- قدرة تحليلية فائقة للطاقة حيث تصل القدرة التحليلية لكواشف الجرمانيوم ليثيوم إلى حوالي 1.7 ك.إ.ف بالنسبة لإشعاعات جاما ذات الطاقة 1332 ك.إ.ف والصادرة من نظير الكوبالت60 الذي يعتبر بمثابة معيار لهذه الخاصية. أما كواشف الجسيمات المشحونة الثقيلة والمجهزة من السليكون فتصل قدراتها التحليلية إلى حوالي 0.3 % . وهذا أفضل بكثير من القدرة التحليلية لغرفة التأين (وهي أفضل الأجهزة الغازية من حيث قدرتها على فصل الطاقات المختلف) ومن القدرة التحليلية للكواشف الوميضية. ويرجع السبب في ذلك إلى زيادة عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية بحوالي عشر مرات عن الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة في غرفة التأين مما يؤدي إلى نقص التراوح الإحصائي النسبي في عدد الأزواج. كذلك، فإنه نتيجة لصغر حجم المنطقة الحساسة للكاشف شبه الموصل فإن التراوح الناتج عن احتمال فقد بعض الأزواج ينخفض انخفضا ملموسا.

ب- وجود علاقة خطية بين طاقة الجسيم النووي واتساع النبضة الكهربائية (أي أقصى ارتفاع لها) الناتجة عنه، وذلك ضمن مدى عريض من الطاقات طالما كان عرض المنطقة الحساسة كافيا.

ج- قصر زمن النبضة الكهربية الناتجة عن الجسيم بسبب صغر حجم المنطقة الحساسة. ويؤدي ذلك إلى إمكانية عد وتحليل معدل عال للجسيمات يصل إلى حوالي 10^6 جسيم/ثانية.

د- إمكانية تغيير عرض المنطقة الحساسة وذلك بتغيير الجهد العكسي.

هـ- إمكانية فصل الأنواع المختلفة من الجسيمات المشحونة الثقيلة عن بعضها. فعندما تحتوي الجسيمات الساقطة على البروتونات وجسيمات ألفا مثلا، يمكن اختيار جهد عكسي صغير (في حدود عدد فولتات)، بحيث لا يزيد عرض المنطقة الحساسة عن مدى جسيمات ألفا. ولكن

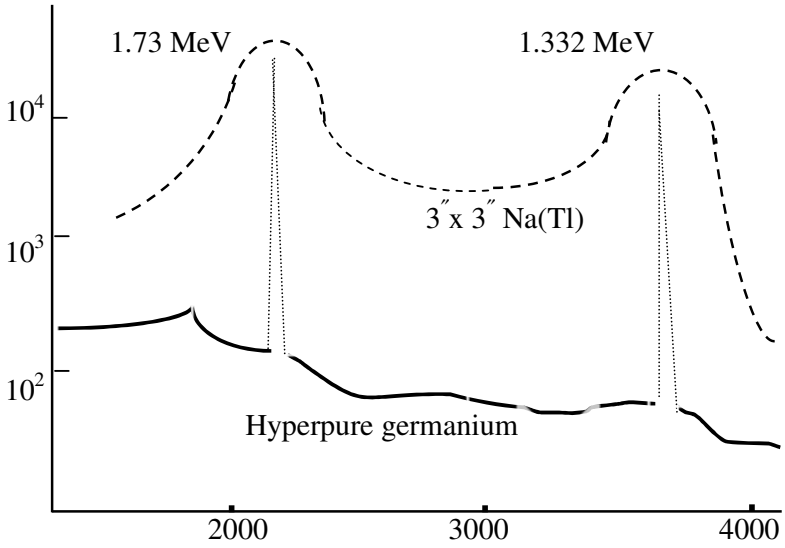
البروتونات تمر من هذا العرض دون أن تفقد جزءا ملموسا من طاقها، فيتم بذلك تسجيل جسيمات ألفا دون البروتونات.

و- صغر حجم الكاشف وسهولة التعامل به.

ز- عدم الحساسية بالنسبة لتغير المجال المغناطيسي.

ح- إمكانية إعداد الكاشف على أشكال هندسية مختلفة كالكواشف ذات الثقب المحوري (annular detectors)، وذلك لإجراء القياسات عند الزوايا القريبة من 180°.

ويمكن المقارنة بين القدرة التحليلية للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات والكواشف الوميضية بالنظر إلى شكل (4-20)حيث يظهر طيف إشعاعات جاما الصادرة من نظير الكوبالت 60 (والذي يشع إشعاعات جاما بطاقتين هما 1173 ك.إ.ف ، 1332 ك.إ.ف) باستخدام كاشف جرمانيومي وآخر وميضي. ويتضح من هذا الشكل القدرة



شكل (4-20)
المقارنة بين القدرة التحليلية لكواشف

التحليلية العالية للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الوميضية.

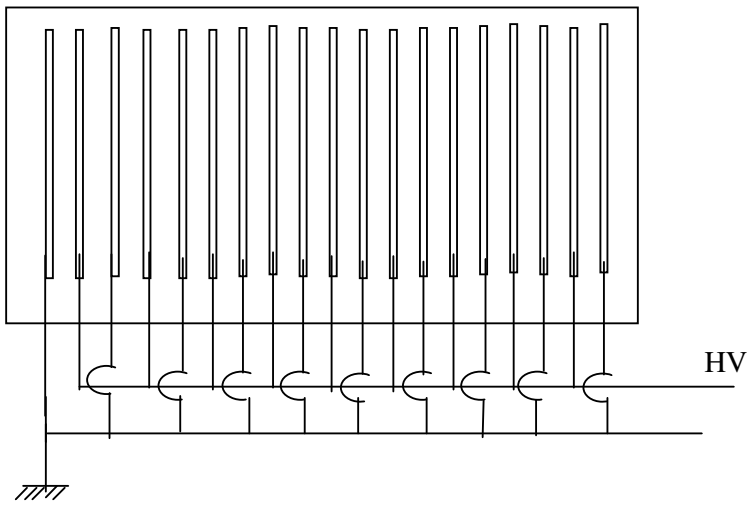
ومن جهة أخرى توجد للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بعض العيوب الأساسية. وتتلخص هذه العيوب في الآتي:

أ- عدم القدرة على استخدامها للكشف عن الجسيمات ذات المدى الطويل أي عند الطاقات العالية.
ب- قصر عمر الكاشف نسبيا بسبب حدوث تغيرات في تركيب المادة وخاصة عند السطح، وكذلك لحدوث تلف إشعاعي لها (radiation damage) نتيجة تعرضها لإشعاعات كثيفة، خاصة النيوترونات.
ج- ضرورة التبريد وعدم إمكانية التشغيل عند درجات الحرارة المرتفعة.
د- زيادة زمن النبضة بالنسبة للكواشف ذات الأحجام الكبيرة.

4-12 العداد الشراري The spark counter

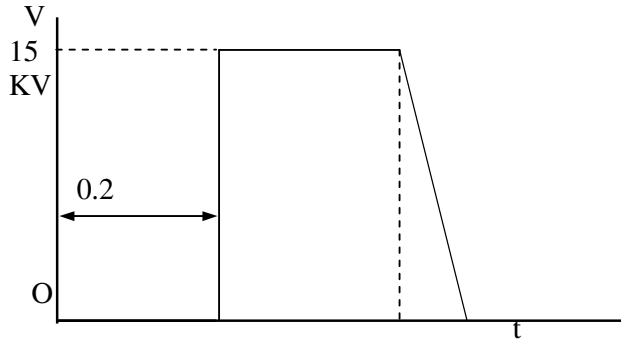
يتكون العداد الشراري (شكل 4-21) من غرفة مملوءة بغاز خامل مثل النيون تحت ضغط قريب من الضغط الجوي. ويوضع في الغرفة عدة ألواح فلزية رقيقة متتابعة. وتتراوح المسافة بين كل لوحين ما بين 2-20مم. ويزداد عدد الألواح أو يقل حسب الغرض المخصص له العداد. وفي بعض العدادات المستخدمة عند الطاقات العالية يصل عدد هذه الألواح إلى أكثر من 130 لوحا. وتوصل الألواح بالتتابع بقطبي منبع جهد عال متردد يصل جهده إلى حوالي 10-15 كيلو فولت. وعند مرور أي جسيم مشحون بين الألواح فإنه يؤين ذرات النيون على طول مساره. عندئذ، تصل نبضة الجهد العالي (10-15 ك.ف) للألواح. ونظرا لوجود فرق جهد عال بين كل لوحين متجاورين ووجود الإلكترونات الناتجة عن التأين بين الألواح تحدث شرارة كهربية بين كل لوحين.

وعموما، يجب إدخال نبضة الجهد العالي إلى الألواح بعد دخول الجسيم بفترة زمنية تصل إلى حوالي 0.2 ميكروثانيـــة وتســـتمر هـــذه النبضة إلى أن تحدث الشرارة الكهربائية. ويبين شكل (4–22) توقيـــت دخول نبضة الجهد العالي بالنسبة لزمن دخول الجسيم الذي يعتبر $t = 0$.

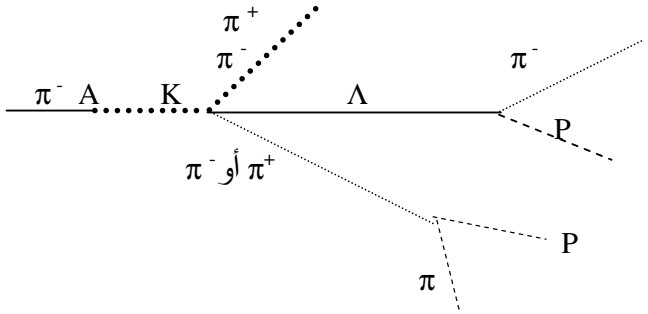


شكل (4–21)
العداد الشراري

وهكذا، تحدث شرارة كهربائية مرئية على طول مسار الجســـيم المشحون. وفي حالة حدوث تفاعلات نووية أخرى وخـــروج جســـيمات مشحونة نتيجة لتصادم الجسيم النووي الساقط مع النوى الموجودة داخل الغرفة تظهر كذلك آثار هذه الجسيمات الجديدة في شكل شرارات كهربية موضحة بذلك مسارها. ويبين شكل (4–23) مسار باي – ميـــزون (π) والتفاعلات الناتجة عند مروره داخل العداد وتفاعله منتجا عدة جسيمات نووية.



شكل (4–22)
توقيت دخول نبضة الجهد العالي بالنسبة لزمن دخول الجسيم (t = 0)



شكل (4–23)
مسار باي– ميزون والتفاعلات الناتجة عند مروره داخل العداد

ويمكن استخدام العداد الشراري في تحديد زخم الجسيم النووي الساقط، وذلك بوضع العداد داخل مجال مغناطيسي ثابت ومتجانس وتحديد الانحناء في المسار بدقة. ويتمتع العداد الشراري بقدرة تحليلية زمنية مساوية لقدرة العدادات الغازية. ويفضل هذا العداد عند الطاقات العالية على الغرفة الفقاعية، وذلك لأنه يمكن اختيار زمن دخول النبضة وتصوير الأثر بعد دخول الجسيم وخلال مدة زمنية معينة. كذلك، فإنه

يمكن سحب الأيونات من الغرفة باستخدام مجال كهربائي خلال مدة لا تزيد على 2 ميكرو ثانية من التصوير.

13-4 كواشف تشرنكوف Cerencov detectors

لاحظ تشيرنكوف أنه عند مرور جسيمات مشحونة في مادة عازلة بسرعة أعلى من السرعة الطورية للضوء في هذه المادة، فإنه ينتج عن ذلك انبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية ضعيفة، يكون ترددها في حدود الضوء المرئي. وتختلف هذه الإشعاعات (المعروفة باسم إشعاعات تشرنكوف) في طبيعتها عن إشعاعات الانكباح، حيث أنها لا تعتمد على العدد الذري للمادة ولا على سرعة الجسيم الساقط.

ويمكن فهم طبيعة إشعاعات تشرنكوف كالتالي:

عند مرور جسيمات مشحونة بسرعات عالية فإنه تصاحبها نبضة كهرومغناطيسية (مجال كهرومغناطيسي متغير زمنيا). وتؤدي هذه النبضة إلى استقطاب ذرات المادة عن طريق إزاحة الإلكترونات المرتبطة بالذرات على طول مسار الجسيم الساقط. وحيث أن هذا الاستقطاب يتغير زمنيا بسبب تغير المجال الكهرومغناطيسي فإنه ينتج عن ذلك إصدار الذرة لإشعاعات في شكل موجات كهرومغناطيسية. فإذا كان الجسيم متحركا بسرعة صغيرة فإن الإشعاعات الصادرة عن الذرات تتداخل تداخلا هداما (destructive interference) عند نقطة بعيدة فتكون شدة الضوء عند هذه النقطة مساوية للصفر. أما إذا كان الجسيم متحركا بسرعة v أعلى من السرعة الطورية (phase velocity) للضوء في هذه المادة، فإنه يمكن أن يكون التداخل عند هذه النقطة البعيدة تداخلا بناءً (constructive interference) ، وبذلك تختلف شدة الضوء عند هذه النقطة عن الصفر. ويمكن إيجاد شروط التداخل البناء من شكل هويجن (Huygen`s construction) (شكل 4-24). فخلال فترة زمنية مقدارها Δt ينتقل الجسيم مسافة مقدارها:

$$AB = v\,\Delta t = (v/C)\,C\,\Delta t = \beta\,C\,\Delta t$$

حيث: C هي سرعة الضوء في الفراغ، β هي:

$$\beta = \mathbf{v} / \mathbf{C}$$

وخلال هذه الفترة نفسها ينتقل الشعاع الخارج من المـــادة مـــن النقطة A إلى النقطة D مسافة مقدارها:

$$A\,D = (C / n)\,\Delta t$$

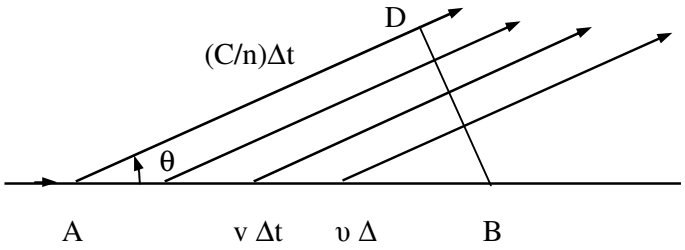
حيث: n معامل انكسار الضوء للمادة. ومن الشكل (4–24) يتبين أن:

$$\cos\theta\theta = AD / AB = 1/\beta\, n \qquad (4\text{-}29)$$

وتحدد هذه العلاقة الحد الأدنى لقيمة β التي ينتج عنها صـــدور إشعاعات تشرنكوف، حيث نجد أنه بالنسبة للمادة المعينة يجب ألا يقـــل مقدار β عن:

$$\beta_{min} = 1 / n \qquad (4\text{-}30)$$

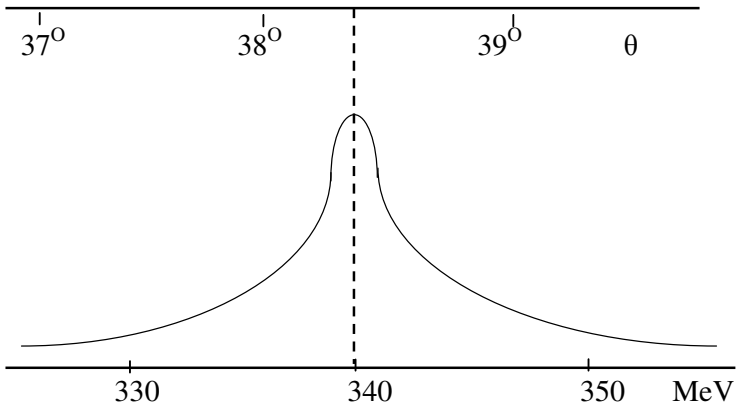
فإذا كانت β أقل من هذا المقدار لا تصدر إشعاعات تشرنكوف عن المادة. وإذا كان معامل الانكسار لمادة ما n = 1.5 ، ومقـــدار β =1 يلاحظ أن: $\theta_{max} = 48^{o}$. أي أن الطاقة التي يفقدها الجسيم تخـــرج فـــي صورة إشعاع مخروطي زاوية رأسه هي: 48 ×2 = 96˚ ، ومحـــوره



شكل (4–24): شكل هويجن

هو اتجاه مرور الجسيم. ويمكن الكشف عن الضوء الصادر باســـتخدام أنبوب التضاعف الفوتوني.

وقد استخدم أثر تشرنكوف لعمل كواشف، بغرض تحديد طاقة الإشعاعات، وذلك بقياس الزاوية القصوى للإشعاعات الصادرة. ويبين شكل (5-25) طيف البروتونات بطاقة 340 ميغا إلكترون فولت، عند الكشف عنها باستخدام عداد تشرنكوف.



شكل (4-25)
طيف البروتونات بطاقة 340 ميغا إلكترون فولت
عند الكشف عنها باستخدام عداد تشرنكوف

14-4 ألواح وأفلام التصوير المستحلبة
Photo- emulsion plates and films

عند مرور الإشعاعات المؤينة كالجسيمات المشحونة الثقيلة والخفيفة والأشعة السينية وإشعاعات جاما خلال ألواح أو أفلام التصوير المستحلبة فإنها تؤين المادة المستحلبة، وتؤدي بالتالي إلى إحداث عتامة في الفيلم أو اللوح الحساس، مثلما يؤثر الضوء المرئي تماما. ويتكون الفيلم الحساس، عموما، من طبقة جيلاتينية رقيقة من مادة بروميد الفضة (Silver bromide) ملتصقة على فيلم بلاستيك شفاف. وفي حالة الألواح الحساسة تستخدم ألواح من الزجاج الشفاف بدلا من البلاستيك. وعند مرور الضوء أو الإشعاعات المؤينة في هذه الطبقة الحساسة تمتص

طاقة هذه الإشعاعات (أو جزء من طاقتها) في مادة بروميد الفضة، فينتج عن ذلك تكون حبيبات صغيرة (تحتوي الحبيبة عادة على عدة ذرات) من فلز الفضة. وعند معالجة الفيلم بالأحماض الخاصة بالإظهار والتثبيت يزداد عدد ذرات الفضة الفلزية في كل حبيبة، فيكبر حجمها وتظهر في شكل حبيبات سوداء على الفيلم البلاستيك أو اللوح الزجاجي. وتعتبر عملية المعالجة بمثابة عملية إظهار وتكبير لحجم الحبيبات، حيث يمكن أن يزداد حجمها بواقع 10^8 مرة. وتتضمن معالجة الفيلم إظهاره ثم تثبيته في حمام يحتوي على مادة الهيبو (hypo)، لإزالة مادة بروميد الفضة التي لم تتأثر بالإشعاعات أو الضوء.

وللحصول على نتائج طيبة وعلى صورة واضحة يجب اختيار مواد المعالجة بتراكيز مناسبة، وتحديد أنسب درجات الحرارة لهذه العمليات، وتحديد الزمن المناسب لعمليتي الإظهار والتثبيت.

وهكذا يظهر أثر مرور الجسيمات المشحونة والإشعاعات في شكل حبيبات سوداء على الفيلم أو اللوح الحساس. وقد لا يمكن رؤية الحبيبات بالعين المجردة ولكن يمكن رؤيتها بسهولة تحت الميكروسكوب.

ومع تطور أنواع الكواشف النووية الأخرى قل استخدام الأفلام والألواح الحساسة للكشف عن الإشعاعات ذات الطاقات المنخفضة، إلا أن هذه الكواشف ظلت مستخدمة استخداما واسعا في مجال الطاقات العالية والأشعة الكونية. ولهذه الأغراض تستخدم ألواح حساسة يتراوح سمك الطبقة الحساسة فيها بين 20 ، 800 ميكرون. ويمكن استخدام هذه الألواح لتحديد عدد الجسيمات (كثافة الإشعاعات) ونوعها وطاقتها. فعند تحديد كثافة الحبيبات وطول الأثر على اللوح وبمعرفة العلاقة بين المدى والطاقة (راجع الفصل الثالث) يمكن معرفة نوع الإشعاعات وطاقاتها.

وعند استخدام الأفلام أو الألواح الحساسة للكشف عن الجسيمات التي لا تؤدي للتأين المباشر، مثل الأشعة السينية وإشعاعات جاما والنيوترونات، فإنه يوضع في المادة الحساسة مواد ينتج عنها جسيمات مشحونة عند تفاعل الأشعة الساقطة معها. فعلى سبيل المثال، يمكن الكشف عن النيوترونات البطيئة بوضع نسبة تصل إلى حوالي 1 % من

مادة الليثيوم أو البور في المادة الحساسة. وعند الكشف عن الأشعة السينية أو إشعاعات جاما يتم وضع شريحة رقيقة جدا من الرصاص فوق المادة الحساسة لإحداث أي من العمليات الثلاثة عليها.

وتتميز الألواح والأفلام الحساسة عن بعض الكواشف الأخرى بالآتي:

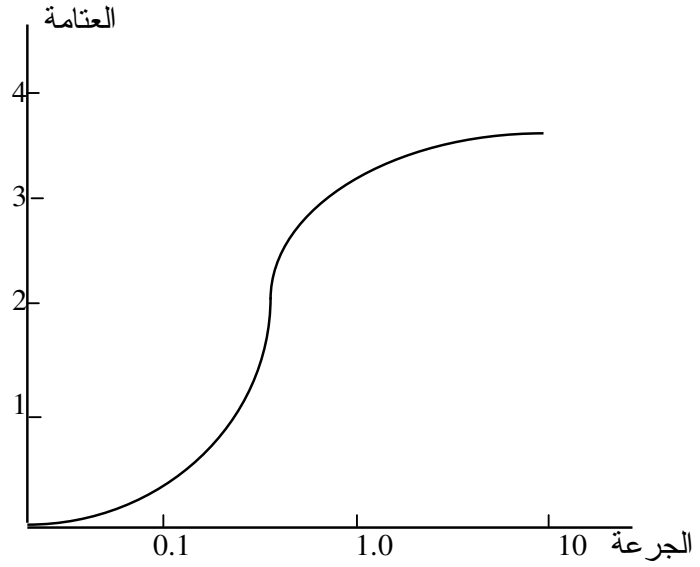
أ- سهولتها وحساسيتها وبقاء الأثر بصفة دائمة عليها.
ب- خفة الوزن وصغر الحجم وانخفاض تكلفتها.
ج- الكثافة العالية لمادة المستحلب الحساسة مما يجعل لها قدرة إيقاف عالية بحيث يمكن استخدامها عند الطاقات العالية.

وأهم عيوب الألواح والأفلام الحساسة هي:

أ- إيجاد طول الأثر وكثافة الحبيبات وزوايا التشتت يستغرق وقتا طويلا من العمل على الميكروسكوب.
ب- نظرا لقصر مدى الجسيمات في مادة المستحلب فإنه يلزم مجال مغناطيسي كبير جدا لإحداث انحرف ملموس في المسار بغرض تحديد زخم الجسيمات.

وعموما، تستخدم الأفلام الحساسة في الوقت الحالي استخداما واسعا للكشف عن الإشعاعات وتحديد الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها العاملون بالإشعاعات والمواد المشعة. ولهذا الغرض، تستخدم أفلام حساسة (مقاس 30 x40 مم) موضوعة داخل حافظة لا تتعرض للضوء. وبعد معالجة الفيلم يتم قياس شدة العتامة الناتجة فيه وذلك بتمرير ضوء خلاله. ويتم تحويل شدة العتامة إلى جرعة إشعاعية ممتصة، وذلك باستخدام منحنى يعرف باسم منحنى المعايرة. ويتم عمل هذا المنحنى بتعريض عدد من الأفلام لجرعات إشعاعية مختلفة ومعلومة وقياس درجة العتامة عند كل جرعة معينة، ثم ترسم العلاقة

بين الجرعة الإشعاعية ودرجة العتامة. ويبين شكل (4–26) أحد هــذه المنحنيات عند استخدام أفلام بحساسية معينة.



شكل (4–26)
العلاقة بين درجة العتامة والجرعة في استخدام ألواح التصوير المستحلبة

وتعتمد حساسية الفيلم، عموما، على حجم حبيبات بروميد الفضة. وعند قياس جرعات إشعاعية عالية تستخدم أفلام ذات حساسية منخفضة. أما عند قيس الجرعات الإشعاعية المنخفضة فيلزم استخدام أفــلام ذات حساسية عالية. وعموما، توجد أفلام تصل حساسيتها إلــى مــدى مــن الجرعات يتراوح بين 10 مللي رم و 10 رم.

4–15 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- قارن بين كل من غرفة والتأين والعداد التناسبي وعداد غايغر من حيث القدرة التحليلية والجهود المستخدمة وشكل النبضة.

2- اشرح الفرق بين غرفة التأين النبضية، والأخرى التي تعمل بنظام التيار المستمر، وما هي إمكانيات استخدام كل منها؟.

3- اشرح دور كل من الحلقات الحارسة والشبكة في غرفة التأين، وفي أي نوع من الغرف تستخدم الشبكة؟.

4- اشرح كيفية حدوث الإطفاء باستخدام دارة خارجية وذاتيا في عدادات غايغر.

5- ما هو تعريف الزمن الميت وزمن الاسترجاع في عداد غايغر؟.

6- قارن بين الأنواع المختلفة لغرف التأين من حيث نوع الإشعاعات التي يمكن تسجيلها.

7- كيف يمكن استخدام الكواشف الغازية للكشف عن النيوترونات وإشعاعات جاما؟، وما هي كفاءتها لهذه الإشعاعات؟.

8- عرف القدرة التحليلية للطاقة والقدرة التحليلية الزمنية للكاشف.

9- اشرح الخطوات التي تحدث لإشعاعات جاما ابتداء من سقوطها على الكاشف الوميضي وحتى ظهور النبضة الكهربائية على مخرجه.

10- أذكر أنواع المواد الوميضية، وقارن بينها من حيث الاستخدام للكشف عن الإشعاعات المختلفة.

11- ما هي أهم مزايا الكواشف الوميضية بالمقارنة بالغازية؟.

12- عرف كفاءة الكاشف، واشرح كيف تتغير كفاءة الكاشف بتغير الطاقة بالنسبة لأنواع الإشعاعات المختلفة.

13- كيف تتغير كفاءة الكاشف بتغير حجم البلورة (للكواشف الوميضية)، وبتغير ضغط الغاز للكواشف الغازية؟.

14- كيف تتغير القدرة التحليلية للطاقة بزيادة حجم البلورة للكاشف الوميضي؟، ولماذا؟.

15- كيف يؤثر الجهد على معامل التضاعف في أنبوب التضاعف الفوتوني؟، وكيف تتغير القدرة التحليلية للكاشف الوميضي بتغير الجهد؟.

16- ما هو دور كل من قطب تركيز الحزمة الإلكترونية والدينود في أنبوب التضاعف الفوتوني؟.

17- ما هي أهم مزايا وعيوب الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات؟.

18- لماذا تتميز الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بقدرة تحليلية عالية؟.

19- اشرح لماذا يغرس الجرمانيوم ثقبي التوصيل بمادة الليثيوم لاستخدامه كاشفا لإشعاعات جاما؟.

20- اشرح كيفية عمل الكاشف السليكوني.

21- اشرح كيفية عمل كاشف الجرمانيوم ليثيوم.

22- ما هي مزايا كاشف الجرمانيوم عالي النقاء بالمقارنة بكاشف الجرمانيوم ليثيوم؟.

23- كيف تعمل الغرفة السحابية كاشفا؟، وما هي أهم مزاياها وعيوبها؟، وما مجال استخدامها؟.

24- ما الفرق بين الغرفة السحابية وغرفة الانتشار؟.

25- اشرح كيفية عمل الغرفة الفقاعية كاشفا، وما هي أهم مزاياها وعيوبها؟.

26- اشرح كيفية عمل العداد الشراري.

27- ما هو مبدأ عمل كواشف تشرنكوف؟، وكيف يمكن استخدامها لتحديد طاقة الجسيمات؟.

28- اشرح كيف تستخدم الألواح الحساسة عند الطاقات العالية؟.

29- ما هو مجال استخدام الأفلام الحساسة؟، وكيف يمكن استخدامها لتحديد جرعات التعرض الشخصي؟.

30- جسيم ألفا يفقد كل طاقته في غرفة تأين منتجا 12000 زوج إلكتروني أيوني. اوجد الشحنة الكلية الناتجة عن تجميع أي من الإلكترونات أو الأيونات. وإذا كانت السعة الداخلية للغرفة 25 بيكوفارد والجهد العالي المطبق 250 فولت، فما هو التغير الناتج في هذا الجهد؟.

31- جسيمات ألفا طاقتها 4.25 ميغا إلكترون فولت تدخل غرفة تأين بمعدل 300 جسيم في الثانية، فما هو التيار الناتج عن هذه الجسيمات إذا كانت الجسيمات تفقد كل طاقتها داخل الغرفة والطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني أيوني هي 35 إ.ف؟.
أوجد قيمة المقاومة الواجب توصيلها على التوالي مع الغرفة ليصبح فرق الجهد الناتج عليها 0.1 فولت، 1 فولت.

32- إذا كان متوسط الممر الحر للإلكترون في عداد تناسبي هو 1 ميكرومتر، وكان معامل التضاعف في هذا العداد هو 4096 ، فما هي المسافة من سلك الأنود التي تبدأ منها عملية التضاعف؟.

33- إذا كان نصف قطر سلك الأنود في المثال السابق 10 ميكرومتر ونصف قطر الأنبوب الداخلي 10 مم، فما هي شدة المجال عند الأنود إذا كان الجهد المستخدم هو 1200 فولت؟.

34- عند دخول جسيم بيتا بطاقة مقدارها 1.7 ميغا إلكترون فولت نتج عنه 5.5×10^{7} زوج إلكتروني في عداد غايغر، فما هو معامل التضاعف لهذا العداد؟، علما بأن الطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد هي 35 إ.ف.

35- ما هو عدد الدينودات المطلوبة لأنبوب التضاعف بحيث تحقق الأنبوب معامل تضاعف مقداره 10^{6} ؟، إذا كان معامل الانبعاث الثانوي للدينودات متساويا ويساوي 4.
وعند انخفاض الجهد لقيمة معينة أصبح معامل الانبعاث الثانوي 3 ، فما هو معامل التضاعف الجديد؟.

36- عند استخدام عداد تشرنكوف لتحديد طاقة جسيمات ألفا كانت زاوية رأس المخروط 80° ، أوجد سرعة هذه الجسيمات.

الفصل الخامس

التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة
Biological effects of the ionizing radiation

– مقدمة – فسيولوجية الإنسان وكيفية دخول المواد المشعة – الخلية الحية – تفاعلات الإشعاعات مع الخلية – التأثيرات الذاتية للإشعاعات – التأثيرات الوراثية للإشعاعات – أسئلة للمراجعة

5-1 مقدمة

يطلق اسم الإشعاعات المؤينة على جميع الإشعاعات النووية كالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا، والإشعاعات الكهرومغناطيسية (الأشعة السينية وأشعة جاما) الصادرة عن الذرة أو النواة، والنيوترونات وغيرها. فالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا (الإلكترونات والبوزترونات) تقوم بتأيين المادة مباشرة عند المرور فيها. أم بالنسبة لإشعاعات جاما والأشعة السينية، فتنتقل طاقتها أولا إلى إلكترونات المادة عن طريق العمليات الثلاثة المعروفة أو بعضها، ثم تقوم هذه الإلكترونات الثانوية بالتأيين وبالتالي تنتمي هذه الإشعاعات إلى المؤينة وإن كان التأيين يتم بطريقة غير مباشرة. وبالنسبة للنيوترونات فتنتقل طاقتها إلى المادة إما عن طريق التشتت المرن أو غير المرن على نوى ذرات المادة أو عن طريق امتصاص النيوترونات (خاصة الحرارية). وحيث أن جميع أجسام الكائنات الحية تحتوي على نسبة عالية جدا من الهيدروجين فإن طاقة النيوترونات تنتقل إلى نوى الهيدروجين (البروتونات)، ثم تقوم هذه الأخيرة بعملية التأين في الجسم. أما النيوترونات التي تمتص في نوى ذرات الجسم فتؤدي بدورها إلى تكوين نوى جديدة وانطلاق إشعاعات جاما التي تؤدي بدورها لتأيين ذرات أو جزيئات الجسم. بذلك تنتمي النيوترونات للأجسام المؤينة، وإن كان التأيين يتم بطريقة غير مباشرة.

وسواء كانت الإشعاعات المؤينة صادرة عن مصدر خـــارجي أم عن التلوث الداخلي للجسم (internal contamination) بالمواد المشـــعة فإنها تؤدي إلى تأثيرات بيولوجية في جسم الكائن الحي يمكن أن تظهر فيما بعد على شكل أعراض إكلينيكية (clinical symptoms). وتعتمـــد خطورة هذه الأعراض والفترة الزمنية اللازمة لظهورها علـــى كميـــة الإشعاعات الممتصة وعلى معدل امتصاصها.

وتنقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات في الكائنات الحية إلـــى نوعين. الأول يعرف بالتأثيرات الذاتيـــة (somatic) وهـــي التـــأثيرات الناتجة في جسم نفس الكائن الحي الذي تعرض للإشـــعاعات. والثـــاني ويعرف بالتأثيرات الوراثية وهي التأثيرات الناتجة فـــي ذريـــة الكـــائن (أبنائه أو أحفاده) نتيجة للتلف الإشعاعي للأعضاء التناســـلية للشـــخص المتعرض.

5-2 فسيولوجية الإنسان وكيفية دخول المواد المشعة

إن معرفة فسيولوجية الإنسان (أي وظائف أعضاء جسم الإنسان وأجهزته المختلفة) ضرورية لفهم طرق وصول المواد المشعة لأعضاء الجسم وتوزعها داخله. وعموما، يتكون جسم الإنسان من عدة أعضـــاء وأجهزة يقوم كل منها بوظيفة معينة. وأهم الأجهزة اللازمة لفهم كيفيـــة توزع المواد المشعة في الجسم هي الجهاز الدوري المسؤول عن ضـــخ وتوزيع الدم، والجهاز التنفسي المسؤول عن التزود بالأكسجين والتخلص من الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء، والجهاز الهضـــمي المسؤول عن هضم وامتصاص الغذاء.

5-2-1 الجهاز الدوري The circulatory system

هو عبارة عن دارة مغلقة من الأنابيب ينتقل خلالها الـــدم مـــن القلب إلى جميع أجزاء الجسم ثم يعود من هذه الأجزاء إلى القلب، الذي يدفع الدم غير المؤكسد إلى الرئتين حيث يـــتخلص مـــن ثـــاني أكســـيد الكربون ويتزود بالأكسجين، ثم يعود الدم المزود بالأكسجين إلى القلـــب

مرة ثانية ليوزعه على كافة أجزاء وأعضاء الجسم. والقلب عبارة عن مضختين. تقوم المضخة اليسرى بدفع الدم المحمل بالأكسجين والغذاء خلال الشرايين (arteries) إلى جميع أنسجة الجسم. وعند مرور الدم في الشعيرات الدموية تحدث عملية تبادل ينتقل خلالها الأكسجين والغذاء إلى الخلايا، في حين تنتقل الفضلات وثاني أكسيد الكربون من الخلايا إلى الدم. ثم يعود الدم في الأوردة إلى القلب. وأما المضخة اليمنى من القلب فتضخ الدم خلال الشريان الرئوي إلى الرئتين حيث يطرد ثاني أكسيد الكربون ويتأكسد الدم ثم يعود من جديد خلال الأوردة الرئوية إلى القلب.

ويحتوي جسم الإنسان كامل النمو على حوالي 5 لترات من الدم وتدور هذه الكمية في الجسم مرة كل حوالي دقيقة. ويتكون الدم من ثلاثة أنواع من الخلايا، هي الخلايا الحمراء (erythrocytes) ، والخلايا البيضاء (lymphocytes + granulocytes) ، والصفائح الدموية (thrombocytes) ، وتقوم كل مجموعة من هذه الخلايا بوظيفة معينة. فتقوم الخلايا الحمراء بنقل الأكسجين والغذاء اللذان تحتاجهما خلايا الجسم إلى كافة الأعضاء والأنسجة. وتقوم الخلايا البيضاء بمهاجمة الميكروبات، لذلك فهي تعتبر بمثابة وسيلة للدفاع ضدها. وأما الصفائح الدموية فمهمتها تكوين الجلطة الدموية عند حدوث أي جروح لمنع حدوث النزيف.

5-2-2 الجهاز التنفسي The respiratory system

تتلخص عملية التنفس في التخلص من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء والحصول على الأكسجين اللازم لحرق الغذاء وتغذية الخلايا. وتحدث هذه العملية في الرئتين عند مرور الدم في شعيراتهما فتتم عملية التبادل في الشعيرات القريبة من الحويصلات الهوائية. ويحتاج الإنسان البالغ إلى حوالي 20 مترا مكعبا من الهواء في اليوم يستهلك نصفها تقريبا خلال ساعات العمل الثمانية.

وأثناء عملية التنفس يستنشق الإنسان مواد غريبة كثيرة تكون في حالة غازية أو في شكل غبار عالق في الهواء. فإذا كانت هذه المواد في

حالة غازية فإنها تمر مع الهواء إلى الدم بنسب كبيرة أو صغيرة حسب سرعة ذوبانها في الدم. وإذا كانت هذه المواد في شكل غبار فإنه يمكن أن يترسب جزء منها في الرئتين، ويخرج الجزء الآخر مع هواء الزفير أو أن يعلق في الجزء العلوي من الجهاز التنفسي، وبالتالي يتم بلعها مع الطعام. ويعتمد سلوك المواد المترسبة في الرئتين على سرعة ذوبانها فإذا كانت سريعة الذوبان فإنها تمتص بسرعة، (أي خلال ساعات محدودة) وتسري مع الدم. وأما إذا كانت بطيئة الذوبان فإنها تعلق في الرئتين لمدة طويلة قد تصل إلى عدة شهور. وبذلك، يتضح أن الجهاز التنفسي يعتبر أحد المداخل الرئيسة لدخول المواد المشعة للجسم ثم انتقالها للدم ومنه إلى أعضاء الجسم المختلفة.

3-2-5 الجهاز الهضمي The digestive system

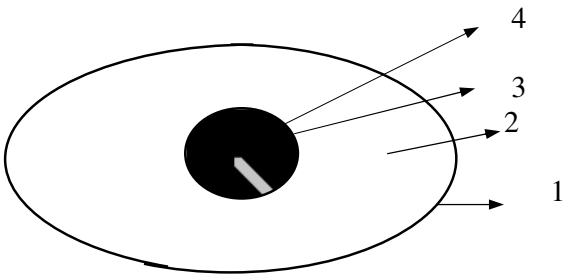
يتكون الجهاز الهضمي من القناة الهضمية المكونة بدورها من البلعوم والمريء والمعدة والإثنى عشر والأمعاء الدقيقة والأمعاء الغليظة وملحقاتها. ويتحول الغذاء في هذا الجهاز بفعل الإنزيمات الهاضمة إلى صور بسيطة ومناسبة لامتصاصه إلى الدم ومنه إلى خلايا الجسم، فتحصل بذلك على الطاقة اللازمة للاحتراق والغذاء اللازم للنمو وإعادة بناء الخلايا. وأما الغذاء الذي لم يمتص وكذلك البكتريا والخلايا الميتة التي تلفظها الأمعاء فتخرج جميعا في شكل فضلات صلبة (براز). وأما الفضلات السائلة وهي الفضلات والأملاح الذائبة في الماء التي تتكون داخل الخلية فيتم إخراجها عن طريق الكليتين (kidneys) والمسالك البولية.

وعند بلع المواد المشعة تمر مع الطعام عبر القناة الهضمية. فإذا كانت هذه المواد من النوع الذي يذوب في الماء أو بفعل الإنزيمات المختلفة فإنها تمتص مع الغذاء وتصل إلى الدم، الذي يوزعها على جميع أجزاء الجسم. ويمكن أن تتركز المواد المشعة في أعضاء معينة من الجسم. فعلى سبيل المثال يتركز السيزيوم 137 المشع في الأنسجة الرخوة في حين يتركز السترونشيوم 90 في العظام. وأما المواد غير القابلة للذوبان في الماء أو الأنزيمات فإنها تمر عبر الجهاز الهضمي كله

وتقوم بتشعيع (أي تعريضه للإشعاع) هذا الجهاز أثناء مرورهـــا فيـــه وخاصة الأمعاء.

5-3 الخلية الحية The cell

تتكون جميع أعضاء الكائنات الحية من وحدات دقيقة تعرف كل وحدة منها بالخلية. وأهم مكونات الخلية هي النواة والسائل المحيط بهـــا والمعروف باسم السيتوبلازم (cytoplasm) وجدار الخلية (شكل 5-1). ويعتبر السيتوبلازم بمثابة " المصنع " للخلية، في حين تحتوي النواة على جميع المعلومات اللازمة لقيام الخلية بوظيفتها وتكاثرها والمحافظة على خصائصها. فالسيتوبلازم يقوم بتحويل الغذاء الذي يصـــله إلـــى طاقـــة وجزيئات صغيرة. وتتحول هذه الجزيئات الصغيرة فيما بعد إلى جزيئات أكثر تعقيدا وهي التي تحتاجها الخلية لعمليات التجديد والانقســـام. أمـــا النواة فتحتوي علـــى الكروموســـومات (chromosomes) التـــي تعتبـــر تراكيب سلسلية طويلة من الجينات (genes) . وتحتوي خليـــة الإنســـان على حوالي 46 كروموسوما. وتتكون الجينات من حـــامض ديوكســـي ريبونيوكليك d-oxyribonucleic acid (DRA) ، ومن جزيئات بروتينية وتحمل هذه الجينات جميع المعلومات التي تحمل الصفات الوراثية.



شكل (5-1): الخلية

1- جدار الخلية 2- السيتوبلازم

3- جدار النواة 4- **النواة**

وتقوم الخلايا بالتكاثر للمحافظة على النوع وتعويض ما يموت منها. ويتراوح عمر الخلية (وبالتالي معدل انقسامها أو تكاثرها في الإنسان) بين عدة ساعات وعدة سنوات وذلك حسب نوع الخلية. ويحدث التكاثر عادة بطريقتين الأولى هي التكاثر اللاجنسي (mitosois) والأخرى هي التكاثر الجنسي (meiosis). ويحدث التكاثر اللاجنسي في خلايا الجسم العادية حيث يتضاعف عدد الكروموسومات طوليا ثم تنقسم الخلية الأصلية إلى خليتين متشابهتين تماما ومشابهتين للخلية الأصلية. أما التكاثر الجنسي فهو نوع خاص يحدث بين نوع من الخلايا تعرف باسم خلايا التكاثر الجنسي وهي الحيوان المنوي في الذكر والبويضة في الأنثى. ويحدث هذا النوع من التكاثر مرة واحدة خلال دورة حياة الخلية. فعند تلاقي الحيوان المنوي مع البويضة يتحدان وتتجمع كروموسوماتهما مكونين بذلك خلية جديدة تحتوي على الجينات (المواد الوراثية) من كلا الوالدين وتتكون بذلك البويضة المخصبة.

5-4 تفاعل الإشعاعات المؤينة مع الخلية

Interaction of the ionizing radiation with the cell

عند سقوط الإشعاعات المؤينة على الخلية فإنها تؤدي إلى تأين بعض مكوناتها وخصوصا جزيئات الماء، الذي يمثل الجزء الأكبر في أية خلية حية. ويؤدي تأين الماء إلى حدوث تغيرات كيميائية قد تؤدي بدورها إلى إحداث تغيرات في وظيفة الخلية. ويمكن أن تظهر نتائج هذه التغيرات في الإنسان في شكل أعراض إكلينيكية كالمرض الإشعاعي (radiation sickness)، أو إعتام عدسة العين (cataract)، أو في الإصابة بالسرطان على المدى الطويل.

وهكذا، تؤدي الإشعاعات المؤينة إلى إتلاف (damage) الخلية من خلال عدة مراحل مختلفة ومعقدة نوجزها فيما يلي:

5-4-1 المرحلة الفيزيائية The physical stage

تتم هذه المرحلة خلال زمن قصير جدا (حوالي 10^{-16} ثانية) من لحظة دخول الإشعاع أو الجسيم للخلية. وفي هذه المرحلة تنتقل الطاقة من النوع المعين من الإشعاعات إلى جزيئات الماء بالخلية ويحدث التأين طبقا للتفاعل التالي:

$$\text{Photon or particle} + H_2O \longrightarrow H_2O^+ + e^-$$

حيث H_2O^+ هو أيون الماء الموجب، e^- هو الإلكترون السالب.

2-4-5 المرحلة الفيزيوكيميائية The physico-chemical stage

وتتم هذه المرحلة خلال زمن قصير (حوالي 10^{-6}) بعد حدوث التأين، ويحدث خلالها تفاعل الأيونات الموجبة والسالبة مع جزيئات الماء الأخرى فينتج عن هذا التفاعل عدة مركبات جديدة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يتحلل أيون الماء الموجب مكونا أيون هيدروجين موجب H^+ وأيون هيدروكسيد OH طبقا للمعادلة التالية:

$$H_2O^+ \longrightarrow OH + H^+$$

أما الإلكترون السالب e^- فيمكن أن يتحد مع جزيء ماء متعادل مكونا بذلك أيون ماء سالب، أي أن:

$$e^- + H_2O \longrightarrow H_2O^-$$

ثم يتحلل هذا الأيون الأخير مكونا الهيدروجين وأيون الهيدروكسيد السالب أي

$$H_2O^- \longrightarrow H + OH^-$$

وهكذا، تؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين كل من أيون الهيدروجين الموجب H^+ ، وأيون الهيدروكسيد السالب OH^- ، وذرة الهيدروجين المتعادلة H ، وجزيء الهيدروكسيد المتعادل OH. وأيونات الهيدروجين H^+ والهيدروكسيد OH^- موجودة دائما في الماء ولا تشترك،عموما، في إحداث تفاعلات تالية. أما بالنسبة للنواتج الأخرى وهي الهيدروجين H ، والهيدروكسيد OH المتعادلة فهي معروفة بنشاطها الكيميائي الشديد. كذلك، يمكن أن يتكون ناتج آخر هو فوق أكسيد الهيدروجين الذي يعتبر عاملا مؤكسدا قويا وذلك طبقا للتفاعل التالي:

$$OH + OH \longrightarrow H_2O_2$$

5-4-3 المرحلة الكيميائية The chemical stage

تستغرق هذه المرحلة عدة ثوان بعد المرحلة السابقة، ويتم خلالها تفاعل نواتج المرحلة السابقة وهي ذرة الهيدروجين H وجزيء الهيدروكسيد OH وفوق أكسيد الهيدروجين H_2O_2 مع الجزيئات العضوية المختلفة في الخلية. فمثلا، يمكن أن تتفاعل هذه النواتج مع الجزيئات المعقدة التي تتكون منها الكروموسومات فتتحد معها أو تؤدي إلى تكسير تراكيبها المتسلسلة الطويلة ويمكن أن تحدث، بالتالي، بعض التغيرات في الجينات.

5-4-4 المرحلة البيولوجية The biological stage

يتراوح زمن هذه المرحلة بين عدة دقائق وعدة عشرات السنوات. وتبدأ في هذه المرحلة ظهور تأثيرات التغيرات الكيميائية التي حدثت في الخلية. وبعض هذه التأثيرات هي:

أ- موت الخلية.
ب- منع أو تأخر انقسام الخلية أو زيادة معدل انقسامها.
ج- حدوث تغيرات مستديمة في الخلية تنتقل وراثيا إلى الخلايا الوليدة.

وهكذا، فإن تأثيرات الإشعاع على الإنسان والكائنات الحية ناتجة عن إتلاف الخلايا. ويمكن أن تتجلى هذه التأثيرات في نفس الشخص المتعرض للإشعاع نتيجة إتلاف الخلايا العادية لجسمه. وتعرف هذه التأثيرات، عندئذ، بالذاتية (somatic effects) . كذلك، يمكن أن تنتقل هذه التأثيرات إلى الأبناء أو الأجيال التالية للشخص المتعرض، وتعرف التأثيرات، عندئذ، بالوراثية (hereditary effects) . وتنتج هذه التأثيرات الوراثية عن إتلاف خلايا الأعضاء التناسلية للشخص المتعرض للإشعاعات المؤينة.

5-5 التأثيرات الحتمية والعشوائية للإشعاعات المؤينة

The deterministic and stochastic effects

5-5-1 التأثيرات الحتمية للإشعاعات The deterministic effects

يتم في معظم أجزاء وأنسجة الجسم البشري تجدد الخلايا الحية، حيث تموت بعض الخلايا ويتم استعواضها بتكوين خلايا جديدة، حتى يستطيع النسيج أو العضو أن يقوم بوظائفه الحيوية. وعند تعرض الأنسجة والأعضاء لجرعات عالية من الإشعاع يموت عدد كبير من خلاياه، ولا تستطيع عملية إعادة بناء الخلايا الجديدة استعواض العدد الكبير المفقود من خلاياه، وبالتالي يحدث نقص كبير في خلايا العضو أو النسيج، الأمر الذي يؤدي إلى فقد العضو أو النسيج لوظائفه. فإذا كان النسيج أو العضو من الأجزاء الحيوية لاستمرار حياة الكائن يكون الموت هو النتيجة الحتمية لهذا الكائن.

وعموما، تنتج التأثيرات الحتمية للإشعاع نتيجة استنزاف عدد كبير من خلايا الأعضاء أو الأنسجة. ويكون احتمال حدوث هذه التأثيرات معدوما عند الجرعات المنخفضة، إلا أنها تحدث حتما عندما تصل جرعة التعرض إلى حد (أو عتبة) معين. ويمكن القول أن التأثيرات الحتمية لا تحدث إلا بعد تجاوز الحد المحدد لكل تأثير، ولا يحدث ذلك إلا عند جرعات عالية جدا. وتؤدي الجرعات الإشعاعية في هذه المنطقة إلى استنزاف وحشي لخلايا الجدار المبطن للأمعاء، حيث يحدث فيه تلف شامل فتهاجمه البكتريا بوحشية. لذلك، تعرف هذه المنطقة من الجرعات بمنطقة الوفاة الناتجة عن الالتهابات المعوية (gastrointestinal death).

ومن أمثلة التأثيرات الحتمية المرض المعروف باسم المرض الإشعاعي، وإعتام عدسة العين وهو المرض المعروف باسم المياه البيضاء أو الكتراكت (cataract) ، والإريثيما (erythema) أو احمرار الجلد، وغيرها.

تلف الجهاز المركزي العصبي (CNS)

عموما، لا توجد بيانات كافية عن الإنسان حول حد الجرعة (أو العتبة) التي يبدأ عندها تلف الجهاز العصبي المركـزي. إلا أن النتـائج التجريبية على الحيوانات أثبت ظهور أعراض تدل على حدوث بعـض التلف في الجهاز العصبي المركزي، وذلك عند جرعات عالية جدا (عدة عشرات من الغراي). لذلك، تسمى هذه المنطقة من الجرعات (التي تزيد على حوالي 30 غراي) بمنطقة الجهاز العصبي المركزي (CNS). ومع ذلك فقد ثبت أن الوفاة لا تتم عن هذه الجرعات في الحال، حتى بالنسبة للحيوانات التي تعرضت لما يزيد على 500 غراي.

الإريثيما Erythema

هناك تأثير آخر يظهر بمجرد التعرض للجرعات العالية نسـبيا. ويعرف هذا التأثير باسم الإريثيما (erythema)، وهو عبارة عن احمرار الجلد. والجلد معرض للتعرض للإشعاعات أكثر من أي نسيج آخر فـي الجسم خصوصا بالنسبة للإشعاعات السـينية ذات الطاقـة المنخفضـة وللإلكترونات (لأن قدرتها على الاختـراق صـغيرة). لـذلك، فـإن التعرض لجرعة مقدارها حوالي 3 غراي من الأشعة السينية ذات الطاقة المنخفضة يؤدي إلى إحداث مرض الإريثيما. وعند زيادة الجرعة يمكن أن تظهر أعراض أخرى كالحروق والتقيحات وغيرها.

وتجدر الإشارة إلى أن المناسيب الإشعاعية الناتجة عن محطـات الطاقة النووية أو عن وسائل التطبيقات الصناعية أو الطبية للإشعاعات التي يتعرض لها العاملون في الظروف العادية (ولـيس فـي ظـروف الحوادث) تكون عادة أقل بكثير من تلك المناسيب الإشعاعية الخطـرة، طالما تم الالتزام بمتطلبات الوقاية من الإشعاع. ولكن يمكن الحصـول على الجرعة الخطرة نتيجة وقوع حادث إشعاعي أو نووي (نتيجة سفور المصدر المشع مثلا خارج درعه أو دخول صالة مفاعل مـثلا بينمـا تكون إحدى قنواته مفتوحة وغير ذلك كثير). ومع ذلك فإن الجرعـات الصغيرة التي يحصل عليها العاملون أثناء عمليات التشغيل العادي يمكن أن تؤدي إلى تأثيرات ضارة، ولكن على المدى البعيد، وهذا ما يعـرف بالتأثيرات المتأخرة.

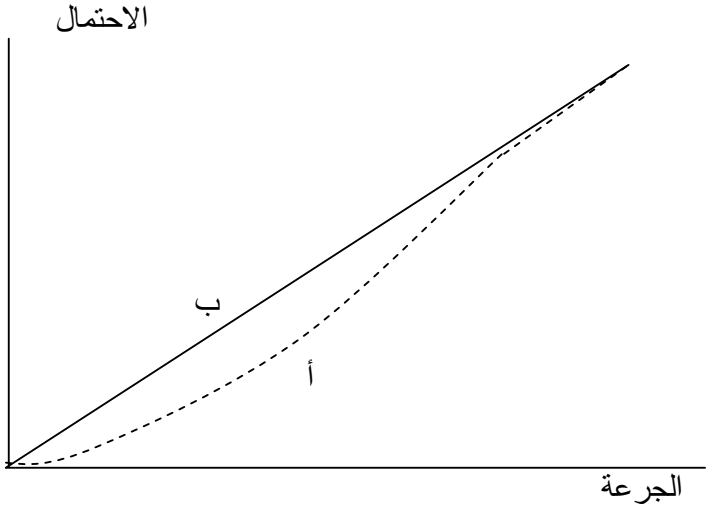
5-6-2 التأثيرات المتأخرة The late effects

أصبح الآن معلوما أن فنيي الأشعة أو المرضى الذين تم علاجهم أو تشخيص أمراضهم بجرعات إشعاعية عالية نسبيا معرضون للإصابة ببعض أنواع السرطان، أكثر من غيرهم ممن لم يتعرض للإشعاعات. ولقد أدت الدراسات الحديثة على المجموعات البشرية التي تعرضت للإشعاعات الناتجة عن القنابل الذرية أو عن الحوادث النووية مثل حادث تشرنوبل، أو المرضى الذين تم علاجهم بالإشعاعات النووية، أو عمال مناجم اليورانيوم، أو العاملين بالإشعاعات المؤينة كأجهزة الأشعة السينية والمعجلات المفاعلات النووية، إلى تأكيد قدرة الإشعاعات على تكوين السرطانات المتنوعة.

والسرطان هو عبارة عن تضاعف (تكاثر) الخلايا في العضو المعين بمعدل فوق المعدل الطبيعي. ويعتقد البعض أنه ناتج عن تلف جهاز التحكم في الخلية، مما يؤدي إلى انقسامها بمعدل أسرع من المعدل الطبيعي. وتحمل الخلايا الوليدة الصفة نفسها فتنقسم بدورها بالمعدل السريع نفسه، مما يؤدي إلى تكوين نسيج سرطاني يضر بالأنسجة العادية في العضو المعين.

وتقدير الفترة اللازمة لظهور الإصابة بالسرطان، بسبب التعرض للإشعاعات، عملية معقدة للغاية نظرا لعدم إمكانية فصل السرطان الناتج عن الإشعاعات المؤينة عن مثيله الناتج ذاتيا أو عن أسباب أخرى كالتعرض للمواد المسرطنة، على سبيل المثال. ولكن أظهرت بعض الإحصائيات أن السرطانات المختلفة قد تظهر خلال مدة تتراوح بين 5 ، 30 سنة من وقت التعرض للإشعاعات. ونظرا للصعوبات المختلفة المتعلقة بمدى الإصابة وزمن ظهورها فقد اتفق عالميا من وجهة نظر الوقاية الإشعاعية على أن أي جرعة من الإشعاعات – مهما قلت – تحمل معها احتمالا بالإصابة بهذا المرض. ولقد أمكن تقدير الإصابة بالمرض بالنسبة للمناسيب الإشعاعية العالية نسبيا. فقد تم عمل دراسات إحصائية دقيقة على المجموعات البشرية التي تتعرض لجرعات عالية من الإشعاعات كالأطباء وفنيي الأشعة وعمال مناجم اليورانيوم. إلا أن الدراسة الأكثر دقة هي تلك الدراسة

التي أجريت على ضحايا التفجيرين النوويين على كل من هيروشيما وناجازاكي في اليابان عام 1945 م . فقد تم دراسة العلاقة بين الجرعة الإشعاعية وبين نسبة الإصابة بالسرطانات المختلفة، وذلك عند الجرعات العالية. أما بالنسبة للجرعات المنخفضة فلا توجد بيانات إحصائية كافية عن الإنسان. لذلك، فقد استخدم امتداد المنحنى من الجرعات العالية إلى الجرعات المنخفضة وذلك كالمبين بالمنحنى أ على شكل (5-2). إلا أن اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) أوصت باستخدام الامتداد الخطي (المستقيم ب على الشكل 5-2) بدلا من المنحنى لتقدير احتمال الإصابة عند الجرعات المنخفضة. وتستخدم هذه البيانات حاليا لتقدير احتمال الإصابة عند التعرض للإشعاعات ذات المناسيب المنخفضة. وبناء على ذلك، فإنه إذا كان احتمال الإصابة بالسرطان عندما تتعرض مجموعة مكونة من 10000 شخص بالتساوي لجرعة مقدارها 10 ميللي سيفرت لكل شخص، هو خمسة أشخاص من بين هؤلاء العشرة آلاف، فإنه عند جرعة مقدارها 100 ميلي سيفرت لكل منهم يصبح احتمال الإصابة بالسرطان بين المجموعة هو 50 شخصا.



شكل (5-2)

العلاقة بين الجرعة الإشعاعية واحتمال الإصابة

وما زالت دراسة احتمال إصـــابة أعضـــاء الجســـم المختلفـــة بالسرطان الناتج عن الإشعاعات تحت المراجعة المستمرة.

ويقوم عدد من اللجان الدولية مثل اللجنة العلمية للأمم المتحدة ، لدراسة تأثير الإشعاع الذري UNSCEAR ، وبعض اللجـــان الوطنيـــة الأخرى في الولايات المتحدة الأمريكيـــة واليابـــان والمملكـــة المتحـــدة وغيرها، بدراسة مخـــاطر الإصـــابة بالســـرطانات المختلفـــة بســـبب الإشعاعات المؤينة، وكيفية توزع الإصـــابات علـــى أعضـــاء الجســـم البشري. ولهذا الغرض يتم استخدام نماذج مختلفة للتقويم ومصادر شتى للمعلومات وأنماط مختلفة للتعرض. ويبين جدول (5–1) أحدث تقـــدير للاحتمالات النسبية لإصابة الأعضاء المختلفة بالسرطان المميت في كل من اليابان والولايات المتحدة والمملكة المتحدة والصين، وفـــي مدينـــة بورتريكو. كما يبين هذا الجدول القيم المتوسطة لهذه الاحتمالات عـــبر

جدول (5–2): الاحتمالات النسبية للسرطانات المميتة في الأعضاء المختلفة في خمس دول والاحتمالات النسبية المتوسطة.

العضو	الاحتمال النسبي تبعا للدولة					
	اليابان	الولايات المتحدة	بورتريكو	المملكة المتحدة	الصين	متوسط الاحتمال
الإثني عشر	0.038	0.014	0.098	0.30	0.269	0.090
المعدة	0.291	0.033	0.136	0.050	0.224	0.144
القولون	0.180	0.320	0.206	0.225	0.103	0.27
الرئتين	0.174	0.205	0.141	0.274	0.097	0.179
الصدر	0.023	0.075	0.048	0.085	0.022	0.052
الخصيتين	0.015	0.031	0.016	0.031	0.020	0.022
المثانة	0.052	0.076	0.078	0.091	0.026	0.067
النخاع العظمي	0.077	0.096	0.127	0.064	0.079	0.089
باقي الأعضاء	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
المجموع	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

الدول الخمس، وذلك لأعمار تتراوح بين صـــفر ، 90 عامـــا، وكقـــيم متوسطة لكل من الذكور والإناث.

5-6-3 معامل المخاطر The risk factor

لتقويم احتمال الإصابة بالتأثيرات العشـــوائية اســـتخدم العلمـــاء مصطلح معامل المخاطر. ويقصد بهذا المعامل احتمال الإصابة بالمرض العشوائي عند التعرض لجرعة إشعاعية محددة. وبالنســـبة للأمـــراض السرطانية، مثلا، فإن معامل المخاطر هو احتمال إصابة الفرد بالسرطان عند تعرضه لجرعة مقدارها 1 سيفرت (100رم). لذلك، يقاس معامـــل المخاطر بوحدة 1/سيفرت.

وعند تغير مقدار الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الفرد يتناســـب معامل المخاطر تناسبا طرديا مع هذه الجرعة، حيث يتناســـب احتمـــال إصابته بالسرطان مع مقدار الجرعة الفعالة تناسبا طرديـــا. فـــإذا كـــان احتمال الإصابة بالسرطان عند جرعة مقدارها 1 سيفرت هو 0.06 (أي 6 %) يصبح هذا الاحتمال عند جرعة مقدارها 2 سيفرت 0.12 ، (أي 12 %). وعندما تتعرض مجموعة بشرية عدد أفرادها n لجرعة فعالـــة متساوية مقدارها E لكل فرد، تصبح قيمة الجرعة الفعالة الجماعيـــة E_c هي:

$$E_C = E\, n$$

ولإيجاد احتمال الإصابة بالسرطان بين هذه المجموعة (أي عدد الإصابات السرطانية بين المجموعة) تستخدم العلاقة التالية:

عدد حالات الإصابة = متوسط الجرعة الفعالة للمتعرض

× عـــــــــــدد

المتعرضـــــين × معامـــــل

المخاطر.

ويبين جدول (5–2) معامل المخاطر السرطانية المختلفة عند التعرض لجرعة إشعاعية فعالة مقدارها 1 سيفرت طبقا لنموذجين من نماذج التقويم، وهما النموذج الضربي، ونموذج المعهد القومي للصحة بالولايات المتحدة الأمريكية (NIH)، حيث تتقارب نواتج معامل المخاطر للنموذجين.

مثال:

يتعرض 1000 عامل في مختبر إشعاعي لجرعة فعالة سنوية مقدارها 20 ميللي سيفرت. أحسب عدد الحالات التي تصاب بالسرطان المميت بين هذه المجموعة طبقا للنماذج المختلفة، إذا علمت أن كل واحد من هؤلاء العمال يعمل لمدة 40 عاما في نفس الظروف الإشعاعية.

الحل :

إجمالي الجرعة التي يتعرض لها الشخص الواحد طوال 40 عاما هي:

$$E = 20 \text{ (mSv/ year)} \times 40 \text{ years}$$
$$= 800 \text{ mSv}$$
$$= 0.8 \text{ Sv}$$

احتمال إصابة العامل الواحد P_1 بالسرطان طبقا للنموذج الضربي هي:

$$P_1 = 0.8 \text{ (Sv)} \times 0.1$$
$$= 0.08 = 8\ \%$$

عدد العاملين N_1 الذين يصابون بالسرطان المميت بين المجموعة هو:

$$N_1 = 0.08 \times 1000$$
$$= 80 \text{ workers}$$

احتمال إصابة العامل طبقا لنموذج معهد الصحة الوطني NIH هي:

$$P_2 = 0.8 \times 0.088$$
$$= 0.0704 = 7.04\ \%$$

عدد العاملين الذين يصابون بالسرطان المميت بين المجموعة طبقا لهذا النموذج هو:

$$N_2 = 0.0704 \times 1000$$
$$= 70.4 = 71 \text{ workers}$$

جدول (5–3): تقويم مخاطر الإصابة السرطانية
طبقا للنموذج الضربي، ونموذج المعهد الوطني الأمريكي للصحة.

الدولة	احتمال الإصابة لكل 1 سيفرت	
	النموذج الضربي	نموذج المعهد الوطني للصحة
اليابان	0.102	0.093
الولايات المتحدة	0.112	0.087
بورتريكو	0.095	0.102
المملكة المتحدة	0.129	0.097
الصين	0.063	0.060
متوسط الاحتمال	0.100	0.088

5–7 التأثيرات الوراثية للإشعاعات
The hereditary effects of radiation

سبق الإشارة إلى أن التأثيرات الوراثية للإشعاعات تنتج عن تلف الخلايا التناسلية. ويؤدي هذا التلف إلى مجموعة تغيرات – تعرف باسم التغيرات الوراثية (genetic mutations) في المادة الوراثية للخلية. وقد سبقت الإشارة إلى تكاثر يحدث نتيجة إخصاب البويضة (ovum) بالحيوان المنوي (sperm) ، وبالتالي تحصل البويضة المخصبة على مجموعة متكاملة من المواد الوراثية من كلا الوالدين. وبذلك، يحصل الطفل على مجموعتين متناميتين من الجينات (genes) بواقع مجموعة من كل والد. وقد وجد أن أحد الجينات يكون هو الغالب (أو السائد) في

حين يكون الآخر منحسرا. والجينات الغالبة هي التي تحـــدد الصـــفات الوراثية الشخصية.

أما الجينات المنحسرة فلا تقوم بدور في تحديـــد الصـــفات، إلا عندما يجتمع اثنان من الجينات من النوع المنحسر. ولما كانـــت معظـــم الأمراض تكمن في الجينات المنحسرة، لذلك فهي لا تكشف عن نفســـها إلا عندما يكون لدى الوالدين نفس هذه الجينـــات المنحســـرة. وتجـــدر الإشارة إلى أن التغيرات الوراثية الذاتية (أي بدون تأثير الإشعاع) هي المسئولة عن الجزء الأعظم من الخمسمائة مرض التـــي يعـــاني منهـــا العالم.

7-5 أسئلة مراجعة

1- اشرح وسائل دخول المواد المشعة لأعضاء الجسم المختلفة.

2- اشرح المراحل الأربعة لحدوث التلف الإشعاعي للخلية.

3- قارن بين التأثيرات الذاتية والوراثية للإشعاعات المؤينة.

4- ما هي التأثيرات المبكرة للإشعاعات على الإنسان؟.

5- ناقش مدى خطورة الجرعات المختلفة مـــن 1 إلـــى 10 جراي على الإنسان.

6- ما هي التأثيرات المتأخرة للإشعاعات؟، وكيـــف يمكـــن تقدير احتمال الإصابة بهذه التأثيرات؟.

7- ما هو معامل الخطورة للإصابة السرطانية؟، وما مقداره للنماذج المختلفة؟.

8- ما هي التأثيرات المتأخرة للإشعاعات؟، وكيف يمكن تقدير احتمال الإصابة بها؟.

9- احسب عدد المهددين بالإصابة بالسرطان نتيجة حادث نووي، أدى إلى تعرض 600000 فرد بواقع 10 ميللي سيفرت لكل منهم إذا كان معامل المخاطر هو 6×10^{-2} لكل سيفرت. (الحل: 360 إصابة سرطانية مميتة)

الفصل السادس

أجهزة المسح الإشعاعي وقياس الجرعات
Radiation survey meters and dosimeters

– مقدمة – أهم خصائص جهاز المسح الإشعاعي – أجهزة المسح الإشعاعي – أجهزة قياس الجرعة الشخصية – أسئلة ومسائل

6-1 مقدمة

تعتبر عملية المسح الإشعاعي ورصد التلوث وقياس معدل الجرعات الإشعاعية، في المختبرات أو الأماكن التي تحتوي على مصادر مشعة أو أجهزة مصدرة للإشعاعات المصادر محكمة الإغلاق أو المواد المشعة المفتوحة أو أجهزة الأشعة السينية أو المعجلات النووية أو المفاعلات، أحد أهم أعمال الوقاية الإشعاعية. ويستخدم لهذا الغرض أجهزة خاصة تعرف باسم أجهزة المسح الإشعاعي (radiation survey meters) لقياس الجرعات الإشعاعية الممتصة أو معدل هذه الجرعات في تلك الأماكن. كما تستخدم أجهزة أخرى خاصة برصد تلوث الأسطح أو الهواء في الموقع يطلق عليها أجهزة رصد التلوث. وتعتمد جميع هذه الأجهزة في عملها على استخدام أحد أنواع الكواشف الغازية أو الوميضية أو غيرها التي ورد وصفها في الفصل الرابع، وذلك بغرض الكشف عن النوع المعين من الإشعاعات، وتحديد سيولته (أي تدفقه) ومعدل الجرعة الناتجة عنه، وبالتالي تحديد الفترة الزمنية التي يمكن أن يمكث الإنسان في المكان المعين خلالها.

وعموما، فإنه لا يمكن استخدام جهاز واحد للكشف عن الإشعاعات المختلفة، وإجراء المسح الإشعاعي وقياس معدل الجرعات الناتجة عنها ورصد التلوث، وذلك لاختلاف طبيعة الكاشف باختلاف نوع الإشعاعات وكمياتها وطاقاتها، وكذلك باختلاف الغرض المخصص له هذا الجهاز. ولذلك، تستخدم عدة أنواع مختلفة من أجهزة المسح

الإشعاعي وتعيين الجرعات أو معدلاتها أو لرصد التلوث، تبعا لنوع الإشعاعات وكمياتها وطاقاتها في المكان المعين . كذلك، توجد عدة أنواع من وسائل قياس الجرعات الشخصية(personal dosimeters) مثل شارة الفيلم الحساس (film badge) والمقياس الحراري الوماض (TLD) وأقلام قياس الجرعات الشخصية والمقاييس الإلكترونية للجرعة الشخصية. ويحمل الشخص الذي يتعامل مع الإشعاعات أو المواد والمصادر المشعة هذه الوسائل بغرض تحديد الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها شخصيا. ويعني هذا الفصل بالتعرف على بعض أنواع أجهزة المسح الإشعاعي وقياس الجرعات الشخصية ورصد التلوث الإشعاعي.

6-2 أهم خصائص جهاز المسح الإشعاعي

Characteristics of Survey Meter

يجب أن تتوفر في جهاز المسح الإشعاعي بعض المتطلبات والشروط من أهمها ما يلي:

أ- بساطة التركيب:

تؤدي بساطة تركيب الجهاز إلى سهولة الاستخدام وإمكانية إجراء الصيانة وتبديل الأجزاء والعناصر المختلفة وخاصة العناصر الإلكترونية عند تلفها.

ب- المتانة:

يجب أن يتحمل الجهاز العمل في مختلف الظروف حيث أنه عادة ما يُستخدم الجهاز الواحد بواسطة عدد كبير من الأشخاص الذين يختلف أسلوب تداولهم للأجهزة.

ج- خفة الوزن وإمكانية حمله ونقله بسهولة:

وذلك نظرا لأن الجهاز يستخدم لإجراء المسح الإشعاعي في أماكن مختلفة. كذلك، يجب أن يزود الجهاز بمنبع تغذية خفيف كالبطاريات الجافة.

د- دقة البيانات والموثوقية:

حيث إن البيانات غير الدقيقة يمكن أن تعرض حياة العاملين للخطر. ولهذا الغرض يجب معايرة الجهاز بصفة منتظمة ودورية، بل وقبل كل استخدام إن أمكن، وذلك بواسطة المصدر المعياري الخاص بالجهاز، حيث يوضع هذا المصدر المعياري أمام الكاشف مباشرة في المكان المخصص لذلك، وتؤخذ قراءة الجهاز لهذا المصدر المعياري، بحيث تكون مطابقة للقراء السابقة باستخدام هذا نفس المصدر المعياري.

هـ الحساسية

يجب أن يتميز الجهاز بدرجة عالية من الحساسية للنوع المعين من الإشعاعات، وذلك لإمكانية الكشف عن الكميات الصغيرة منها.

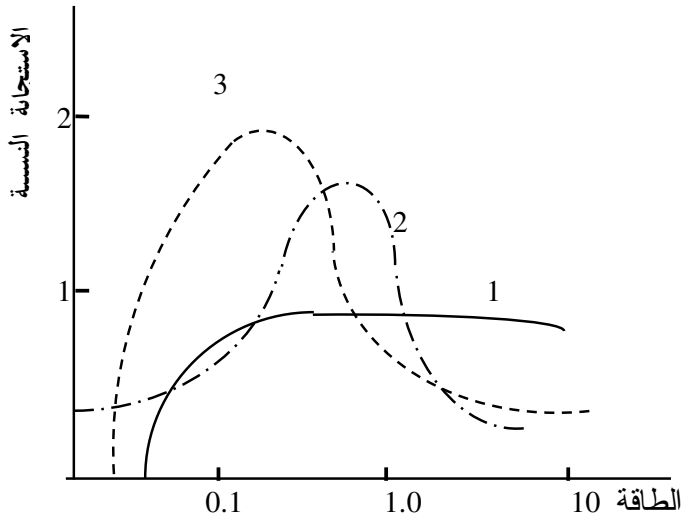
3-6 أجهزة المسح الإشعاعي The survey meters

يتكون جهاز المسح الإشعاعي، عموما، من كاشف ودارة إلكترونية لتكبير التيار أو الجهد وجهاز لقياس شدة التيار الكهربائي الناتج عن الإشعاعات أو عدد النبضات الجهدية في وحدة الزمن. وتزود بعض هذه الأجهزة (التي تعمل بالنظام النبضي) بجهاز صوتي يصدر صوتا كلما تم تسجيل نبضة فيه، وبالتالي يمكن التنبه إلى زيادة المستوى الإشعاعي صوتيا، ودون الحاجة إلى النظر إلى قراءة الجهاز بين وقت وآخر. وتستخدم كواشف مختلفة لأغراض المسح الإشعاعي، وهي غرف التأين أو العدادات التناسبية أو عدادات غايغير- ميولر أو الكواشف الوميضية. ويعتمد حجم الكاشف المستخدم ومواصفاته على نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها وإجراء المسح لها وعلى كثافة المجال الإشعاعي الذي يخضع للقياس.

فبالنسبة للإشعاعات السينية وإشعاعات جاما يفضل استخدام جهاز بكاشف عبارة عن غرفة التأين، علما بأن بعض الكواشف الأخرى صالحة للاستعمال مع هذه الإشعاعات. وأما بالنسبة للكشف عن

جسيمات بيتا وألفا فإنه من المفضل استخدام عداد تناسبي أو عداد غايغر. في حين يمكن استخدام أي من غرفة التأين المزودة بطبقة رقيقة من البور أو العداد التناسبي المزود بغاز ثالث فلوريد البور (BF_3) للكشف عن النيوترونات الحرارية. كذلك، تستخدم العدادات التناسبية المزودة بمادة غنية بالهيدروجين مثل البولي إيثيلين، وذلك للكشف عن النيوترونات السريعة، حيث ينطلق البروتون من هذه المادة عند اصطدام النيوترون الساقط به، فيقوم البروتون بإجراء التأيين داخل الغاز.

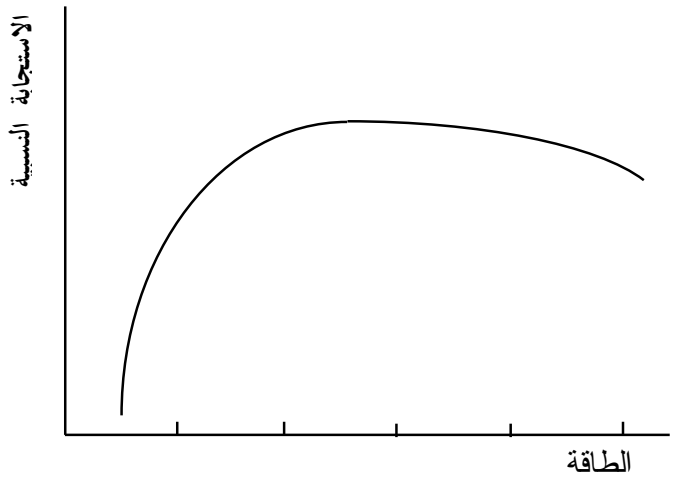
وحيث أن التأيين الناتج في معظم الكواشف يعتمد اعتمادا كبيرا على طاقة الجسيمات النووية فإنه يجب أن تتميز الأجهزة المخصصة لقياس معدل الجرعة من الإشعاعات المختلفة باستجابة صحيحة للطاقة. ويعرف مدى الاستجابة النسبي للطاقة على أنه عبارة عن نسبة شدة التيار الناتج في الجهاز عند الطاقات المختلفة إلى شدة التيار عند طاقة محددة (أو نسبة عدد النبضات في وحدة الزمن عند الطاقات المختلفة إلى عددها عند الطاقة المعينة)، مع بقاء عدد الجسيمات الساقطة أو



شكل (6-1)
منحنيات الاستجابة لكل من غرفة التأين (1) وعداد غايغر ميولر (2)

والكاشف الوميضي (3)، بالنسبة للإشعاعات السينية وإشعاعات جاما

الإشعاعات ثابتاعند جميع الطاقات. ويبين شكل (6-1) منحنيات الاستجابة للطاقة لكل من غرفة التأين (المنحنى 1) وعداد غايغر ميولر (المنحنى 2) والكاشف الوميضي، والكاشف الوميضي (المنحنى 3) وذلك بالنسبة للأشعة السينية وإشعاعات جاما. ويتضح من هذا الشكل أن غرفة التأين تتميز باستجابة ثابتة للطاقة في مدى واسع من الطاقات (من حوالي 0.3 حتى حوالي 10 ميغا إلكترون فولت). أما بالنسبة لكل من عدادات غايغر والكواشف الوميضية فهي تتميز باستجابة عالية عند الطاقات المتوسطة (من حوالي 300 حتى حوالي 1000 ك.إ.ف) في حين يقل مدى الاستجابة بسرعة عند الطاقات العالية أو المنخفضة، وبذلك يمكن أن تعطي هذه العدادات قراءات خاطئة عند هذه الطاقات، يلزم تصحيحها.



شكل (6-2)
منحنى الاستجابة لعداد غايغر ميولر عند استخدام مرشح من الرصاص

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن الحصول على استجابة نسبية شبه ثابتة بالنسبة لعدادات غايغر وذلك عند استخدام مرشحات من مواد مختلفة كالرصاص وغيره، أمام طرف العداد. فعند عمل مرشح من الرصاص (سمكه 0.3 سم) والصفيح (سمكه 1.5 سم) يتخذ منحنى الاستجابة كدالة من الطاقة الشكل المبين بالمنحنى (6-2).

ولمعايرة أجهزة المسح الإشعاعي الخاصة بالكشف عن إشعاعات جاما يستخدم مصدر مشع من نظير السيزيوم 137 الذي تبلغ طاقته662 ك.إ.ف أو من نظير الراديوم 226 ، الذي تعتبر طاقته الفعالة في حدود 0.8 ميغا إلكترون فولت. فعند استخدام الجهاز لقياس معدل الجرعة الإشعاعية لإشعاعات ذات طاقات مختلفة فإنه يمكن أن تكون قراءة الجهاز من هذه الإشعاعات الجدية أقل أو أكثر من معدل الجرعة الحقيقي لها. لذلك، فقد تم حديثا إدخال بعض التعديلات على كل من عدادات غايغر والكواشف الوميضية بحيث تعطي استجابة أفضل في مدى أوسع من الطاقة (من 0.1 وحتى 2 ميغا إلكترون فولت).

6-3-1 أجهزة المسح الإشعاعي ذات غرفة التأين

Ionization chamber survey meters

يمكن تصميم أنواع مختلفة من غرف التأين لاستخدامها للكشف عن جميع أنواع الإشعاعات ولكنه يفضل استخدام غرف التأين في أجهزة المسح الإشعاعي للكشف عن إشعاعات جاما. ولما كانت حساسية غرف التأين صغيرة للغاية بالمقارنة بالعدادات التناسبية أو عدادات غايغر فإنها تفضل عند إجراء المسح الإشعاعي لمستويات إشعاعية عالية، بحيث لا يقل معدل الجرعة عن عدة عشرات ميكروسيفرت/ساعة حيث تعطي غرف التأين نتائج عالية الدقة عند هذه المعدلات. ويرجع السبب في تفضيل غرفة التأين إلى ثبات استجابتها للطاقة في حدود واسعة، مما جعلها من أنسب الكواشف لأغراض المسح وأعمال الوقاية الإشعاعية. وتعمل الغرفة لهذه الأغراض، عموما، بنظام قياس متوسط

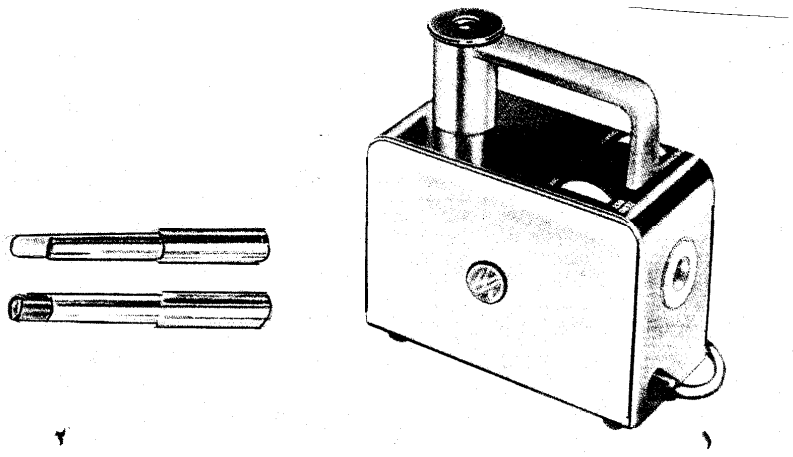
شدة التيار الناتج وليس بالنظام النبضي. ولعل من المفيد استعراض بعض أنواع أجهزة المسح الإشعاعي التي تستخدم غرف التأين ككاشف.

أ- مقياس التعرض (بالرينتجن) على شكل مكثف

The condenser R- meter

يعتبر هذا الجهاز من أدق الأجهزة المستخدمة لقياس التعرض (exposure) التراكمي (بالرينتجن) لإشعاعات جاما والأشعة السينية. ويتميز باستجابة ثابتة للطاقة ودقة عالية مما جعله من بين الأجهزة المستخدمة للمعايرة. ويتكون هذا الجهاز (شكل 6-3) من جزأين رئيسيين هما:

1- جهاز الشحن والقراءة (charger- reader device)
2- مجموعة من غرف التأين مجهزة بوسيلة التحام واتصال بجهاز الشحن والقراءة .



شكل (٦ - ٣)

مقياس التعرض (بالروينتجن) على شكل مكثف

١ ـ جهاز الشحن والقراءة

٢ ـ مجموعة من غرف التأين

ويحتوي جهاز الشحن والقراءة على تجويف خاص تدخل فيه غرفة التأين. ويتم شحن غرفة التأين إلى أن يصل مؤشر الجهاز لتدريج الصفر. ويظهر كل من المؤشر والتدريج خلال العدسة العينية للميكروسكوب المركب على تدريج الجهاز. ويعني وصول المؤشر إلى الصفر أن الغرفة أصبحت مشحونة تماما. بعد ذلك، يتم تعريض الغرفة للإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما، ويعاد إدخالها من جديد إلى التجويف. ويتم أخذ القراءة التي يقف عليها المؤشر بعد الإدخال. وتقيس هذه القراءة قيمة الجهد الناتج عن دخول الإشعاعات وتأيينها للغاز داخل الغرفة أي أنها تقيس قيمة التعرض بالرينتجن (أو أجزائه) مباشرة.

وغرفة التأين في هذا الجهاز هي عبارة عن مقياس كهربائي (electrometer) بسيط يحصل فيها كل من القطب المركزي والجدران على شحنات كهربية مختلفة (أي إلكترونات أو أيونات). وتصنع

جدران الغرفة عادة من مادة مكافئة تماما للهواء الجوي (العدد الـذري المتوسط للهواء الجوي هو Z = 7.64)، وهي البكلايـت أو النـايلون. وتشكل الغرفة على شكل كستبان ولذلك تعرف باسم غرفـة الكسـتبان (thimble chamber). وحيث إنه يجب أن يحدث التـأين فـي الهـواء الموجود داخل الغرفة فإنه يجب استخدام غرف بأحجام مختلفة وبسـمك مختلف للجدران، وذلك للفوتونات ذات الطاقات المختلفة. ويوجـد فـي الوقت الحالي ثلاثة أنواع من الغرف يختص كل نوع منها بمدى معـين لطاقة الإشعاعات وهي:

1- غرفة الإشعاعات ذات الطاقة المنخفضة من 6 حتى 35 ك.إ.ف.
2- غرفة للإشعاعات ذات الطاقة المتوسطة مـن 35 حتـى 400 ك.إ.ف.
3- غرفة للإشعاعات ذات الطاقة العاليـة مـن 400 حتـى 1400 ك.إ.ف.

ويوجد من كل نوع من هذه الأنواع الثلاثة غرف ذات حساسيات مختلفة حسب شدة المصدر أو المستوى الإشعاعي الموجود في المكـان المعين.

وتتراوح دقة قياس التعرض بهذا الجهاز ما بين 2 إلـى 10 % عند الاستخدام السليم وتعتبر هذه الدقة دقة عالية نسبيا.

ب- جهاز قياس معدل التعرض(رينتجن/ساعة)

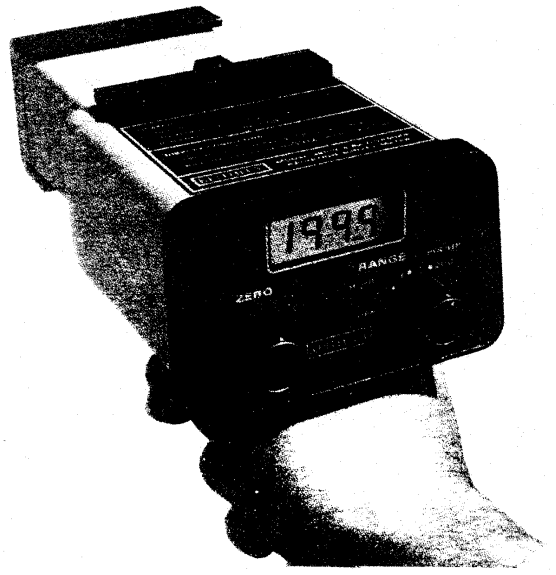
Cutie pie survey meter (R/h)

يستخدم هذا الجهاز لقياس معدل التعرض الناتج عن إشـعاعات جاما أو الأشعة السينية. وقد تم تطوير أنواع منه لقياس معدل التعـرض الناتج عن جسيمات بيتا. ويعرف الجهاز عند بعض العاملين في مجـال الوقاية الإشعاعية باسم "Cutie pie" . وعلى الرغم من أن هذا الاسم يعبر عن الماركة التجارية للأجهزة التي تنتجها إحدى الشركات المتخصصـة

في إنتاج هذا النوع من الأجهزة. إلا أنه شاع استخدامه بالنسبة لأجهزة قياس معدل التعرض التي تستخدم غرفة التأين ككاشف للإشعاعات. وتملأ غرفة التأين في هذا الجهاز بالهواء الجوي. ويتميز هذا الجهاز باستجابة ثابتة على مدى كبير للطاقة. ومن أهم عيوبه أنه قليل الحساسية. لذلك، فإنه يستخدم للمسح الإشعاعي وتحديد معدل التعرض في حالة وجود مستويات إشعاعية عالية. ويبين شكل (6-4) صورة فوتوغرافية للجهاز.

6-3-2 أجهزة مسح إشعاعي بعداد تناسبي أو عداد غايغر
Proportional or G-M type survey meters

يعتبر هذا النوع من الأجهزة من أهم أجهزة المسح بالنسبة لجسيمات بيتا أو إشعاعات جاما ذات المستويات الإشعاعية المنخفضة. ويرجع السبب في ذلك إلى إمكانية عمل كواشف من هذا النوع بأحجام وأشكال مختلفة وإلى الحساسية الفائقة لعدادات غايغر بالمقارنة بغرف التأين. لذلك، تستخدم هذه الأجهزة للكشف عن التلوث بالمواد المشعة أو للبحث عن المصادر المشعة المفقودة مهما قلت شدتها الإشعاعية فضلا عن استخدامها الرئيسي لقياس معدل التعرض للمستويات الإشعاعية الضعيفة. وتعمل جميع أنواع الأجهزة التي تستخدم العداد التناسبي أو عداد غايغر ككاشف بالنظام النبضي. كذلك، تزود معظم الأجهزة بجهاز تنبيه سمعي يطلق صوتا قصيرا عند تسجيله لكل جسيم أو فوتون. وبذلك، يمكن الحكم سمعيا على شدة المستوى الإشعاعي بالإضافة إلى مقياس معدل التعرض الموجود بالجهاز الذي يبين معدل العد (أي عدد النبضات في الدقيقة).



شكل (6–4)
جهاز قياس معدل التعرض

وعموما لا تستخدم مثل هذه الأجهزة في قياس معدل التعرض في المستويات الإشعاعية العالية بسبب طول الزمن الميت لعداد غايغر.

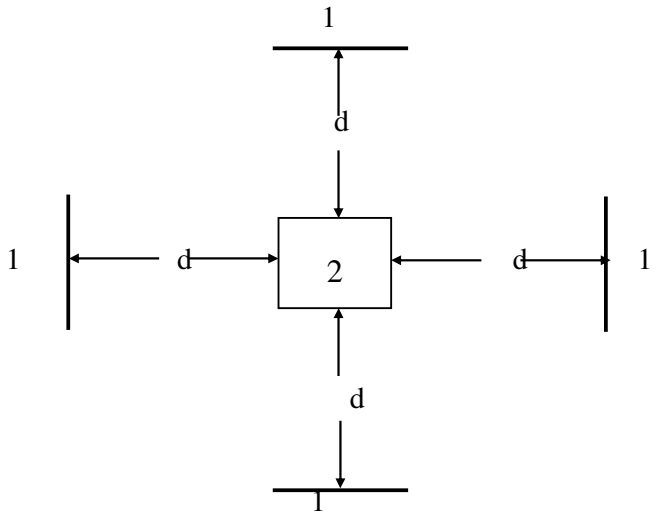
6-3-3 معايرة أجهزة المسح الإشعاعي

يتم معايرة جميع أجهزة المسح الإشعاعي من قبل المنتج عند إنتاجها. ولكن نظرا لتغير خصائص مكونات الجهاز وأجزائه المختلفة فإنه يجب إعادة معايرة هذه الأجهزة بصفة دورية، وذلك للتأكد من صحة قراءتها. وتعتبر إعادة المعايرة أمرا أساسيا وفي غاية الأهمية وخصوصا بالنسبة للأجهزة التي تستخدم عدادات غايغر حيث يجب معايرتها بواقع مرة كل ثلاثة شهور وبعد إجراء أية صيانة للجهاز، وكذلك عند كل تغيير للبطاريات.

وتتم معايرة أجهزة المسح الإشعاعي، وذلك بوضع الكاشف في وضع هندسي معين بالنسبة للمصدر المشع. ويفضل أن يكون المصدر المستخدم للمعايرة من النوع الذي يصدر نفس الإشعاعات المطلوب إجراء مسح إشعاعي لها. وغالبا ما يستخدم لهذا الغرض مصادر معلومة النشاط الإشعاعي من السيزيوم 137 والكوبلت 60 والراديوم 226. ويجب أن تتطابق ظروف المعايرة مع الظروف الفعلية لاستخدام الجهاز، وأن تتم المعايرة لجميع التداريج الموجودة على الجهاز، وذلك باستخدام مصادر متنوعة النشاط الإشعاعي. كما يجب أن تتم المعايرة على عدة مسافات بين المصدر والكاشف، للتأكد من صحة القياسات (وذلك بمطابقة النتائج مع قانون التربيع العكسي للمسافة) علما بأن المسافات المفضلة تتراوح بين حوالي 1 -3 متر.

وفي بعض الأحيان يفضل إجراء المعايرة في مجال إشعاعي متجانس وذلك باستخدام أربعة مصادر لها نفس الشكل والنشاط الإشعاعي، مع وضع هذه المصادر الأربعة في وضع كالمبين في شكل (6-5) حيث يكون المجال بين المصادر الأربع شبه متجانس (أي شدة الإشعاعات تكاد تكون ثابتة). وعند إجراء المعايرة أو القياسات فإنه يجب أن تؤخذ الخلفية الإشعاعية في الحسبان. كذلك، فإنه في حالة

استخدام الكواشف النبضية يجب أن يوضع في الاعتبار الـزمن الميـت للكاشف، حيث إن هذا الزمن يؤدي إلى قراءة أقل من القراءة الحقيقيـة. لذلك، يجب تصحيح القراءات بالنسبة للأزمنة الميتة والخلفية الإشعاعية وتحديد نسب الخطأ في القراءة.



شكل (6-5)
المعايرة في مجال إشعاعي متجانس
1- 4 مصادر 2- كاشف

6-4 أجهزة رصد التلوث الإشعاعي

The contamination monitors

قد لا يحتاج العاملون بالمواد المشعة المفتوحة لأجهـزة مسـح إشعاعي لتقدير الجرعات الخارجية التي يتعرضون إليها نظرا لأن مقدار هذه الجرعات الخارجية من إشعاعات جاما أو النيوترونات مـن هـذه المصادر قد يكون صغيرا. إلا أن المخاطر الرئيسة قد تتمثل في تلـوث بيئة العمل مثل الأسطح والمعدات، أو وجود تسرب للمادة المشعة مـن المصدر محكم الإغلاق، أو تلوث الهواء في منطقة العمل بالمواد المشعة

خاصة الطيارة منها مثل اليود 131. ويمثل تلوث الأسطح أو الأيدي أو الملابس أو الهواء مخاطر جسيمة يمكن أن تزيد كثيرا على مخاطر التعرض الخارجي، في حين لا يمكن الكشف عن هذا التلوث باستخدام أجهزة المسح الإشعاعي سابقة الذكر.

ويتكون جهاز رصد التلوث، شأنه شأن جهاز المسح الإشعاعي، من كاشف وجهاز إلكتروني لتكبير جهد النبضة وتسجيلها، حيث تعمل جميع أجهزة رصد التلوث بالنظام النبضي. إلا أن أجهزة رصد التلوث تتميز بحساسية فائقة بالمقارنة بأجهزة المسح الإشعاعي عالية الحساسية.ويعود السبب في ذلك إلى أن الكواشف المستخدمة في أجهزة رصد التلوث هي من النوع المخصص للكشف عن جسيمات ألفا أو بيتا (أي الجسيمات المشحونة فقط) دون غيرها. ولا تعتمد أجهزة رصد التلوث على قياس إشعاعات جاما أو النيوترونات حتى لو كان المصدر المعين يشع هذه الإشعاعات أو الجسيمات. فكفاءة الكاشف لتسجيل هذه الإشعاعات أو النيوترونات صغيرة للغاية (قد تقل عن 1 لكل 100000 فوتون أو نيوترون). فضلا عن ذلك فإن هذه الإشعاعات قد تكون صادرة من مصادر بعيدة للغاية وتصل للكاشف نظرا لقدرتها الفائقة على اجتياز المادة. أما بالنسبة للجسيمات ألفا وبيتا فتبلغ كفاءة الكاشف لتسجيل هذه الجسيمات 100 % طالما دخل الجسيم إلى داخل الكاشف. لذلك، تجهز كواشف رصد التلوث بنافذة كبيرة ورقيقة للغاية للسماح بمرور هذه الجسيمات. وبمجرد دخول الجسيم المشحون داخل الكاشف فإنه يسجل، وبالتالي يمكن الكشف عن وجود التلوث.

وتجدر الإشارة إلى أن معظم الكواشف المستخدمة لرصد التلوث تستخدم عدادات غايغر– ميولر ذات النافذة الرقيقة. ويقاس التلوث عادة بعدد البضات المسجلة في وحدة الزمن، ولتكن الدقيقة. كذلك، تتفاوت حساسية الكاشف المخصص لرصد التلوث تفاوتا كبيرا. فالأجهزة التي تصلح لقياس تلوث باليود 131، على سبيل المثال، مقداره 1000 بكرل/سم^2 يصعب استخدامها لقياس حد التلوث الذي يبلغ 0.4 بكرل/سم^2. وتتوقف حساسية جهاز (أو كاشف) رصد التلوث على

مساحة سطح النافذة، فكلما زادت مساحة هذا السطح زادت كفاءة (حساسية) هذا الكاشف.

6-5 أجهزة قياس الجرعات الشخصية

Personal dosimeters

يستخدم المسح الإشعاعي عامة لتحديد المستوى الإشعاعي ومعدل التعرض في المكان أو المختبر المعين، وذلك لمنع وجود العاملين في هذه الأماكن، أو لتحديد الفترة القصوى لمكوثهم فيها، وبالتالي لتلافي التعرض للجرعات الخطرة. ولكن لا يستخدم المسح الإشعاعي كطريقة دقيقة لتحديد الجرعات الإشعاعية الشخصية التي يتعرض لها العاملون في هذه الأماكن خلال مدة زمنية معينة وذلك للأسباب التالية:

أ- اختلاف معدل الجرعة باختلاف الظروف داخل المختبر كتغير سيولة أو طاقة الإشعاعات.
ب- تنقل العاملين من مكان إلى آخر داخل المختبر واختلاف معدل التعرض باختلاف هذه الأماكن.

ولتحديد الجرعة الفعالة التي يتعرض لها العامل في فترة زمنية معينة مثل هذه الأماكن فإنه يجب أن يحمل (يرتدي) العامل وسيلة تعرف باسم مقياس الجرعة الشخصية (personal dosimeter). ويكثر استخدام ثلاثة أنواع من هذه الوسائل، وهي الفيلم الحساس، ومقياس الجرعة الجيبي، ومقياس الجرعة باوميض الحراري (TLD)

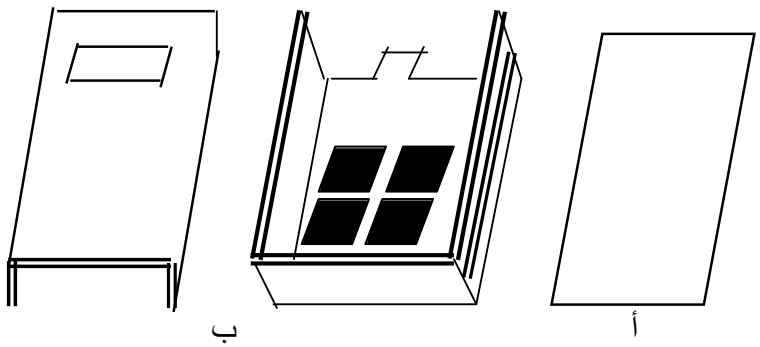
1-5-6 شارة الفيلم الحساس The film badge

حتى فترة قصيرة كانت شارة الفيلم الحساس من أكثر الوسائل انتشارا كمقياس للجرعة الشخصية. ويتكون هذا المقياس من فيلم حساس يوضع داخل حافظة خاصة من البلاستيك تعرف بشارة الفيلم الحساس (film badge). ويختلف نوع الفيلم المستخدم باختلاف الغرض المخصص له. وتستخدم الآن في العديد من دول العالم أفلام (radiation

(monitor خاصة بالكشف عن الإشعاعات. وهذه الأفلام عبارة عن شريحة رقيقة من البلاستيك مغطاة من كلا الوجهين بالمستحلب الحساس، بحيث يكون المستحلب على أحد الأوجه من النوع السريع في حين يكون من النوع البطيء على الوجه الآخر. والغرض من ذلك هو إمكانية قياس الجرعات الفعالة في مدى واسع من الجرعات. فالمستحلب السريع (fast emulsion) يمكن من قياس الجرعات الفعالة إذا تراوحت هذه الجرعات بين 50 ميكروسيفرت، 50 ميللي سيفرت. أما إذا زادت جرعة الإشعاعات الفعالة عن 50 ميللي سيفرت فإن هذا يؤدي إلى نزع طبقة المستحلب السريع من الفيلم عند معالجته (تظهيره وتثبيته) في شكل قشرة وتبقى طبقة المستحلب البطيء (slow emulsion) الأقل حساسية. وبذلك، يمكن قياس الجرعات الفعالة التي تتراوح قيمتها بين 50 ميللي سيفرت وحوالي 10 سيفرت. ويستخدم أحيانا زوج من الأفلام الحساسة بدلا من استخدام فيلم واحد ذي وجهين مختلفي الحساسية. وعند تظهير الفيلم وتثبيته تصبح مناطق الفيلم التي مرت الإشعاعات خلالها معتمة. وتتناسب درجة العتامة مع كمية الإشعاعات من كل نوع. وتقاس درجة العتامة باستخدام جهاز خاص يعرف بمقياس العتامة (densitometer) . وبعد ذلك يمكن تحديد الجرعة الإشعاعية لكل نوع من الإشعاعات، وذلك بالرجوع إلى منحنى العلاقة بين الجرعة الإشعاعية ودرجة العتامة (راجع الفصل الرابع).

أما الحافظة (شكل 6-6) فهي عبارة عن علبة رقيقة من البلاستيك تحتوي على عدة فتحات ونوافذ، وذلك لتثبيت عدة قطع فلزية تعمل بمثابة المرشحات للكشف عن نوع الجسيمات (جسيمات بيتا، وإشعاعات جاما، والأشعة السينية والنيوترونات). ويكون الغرض من بعض هذه المرشحات أحيانا تمييز طاقة إشعاعات جاما والإلكترونات. ويتم الكشف عن جسيمات بيتا وتحديد كميتها وطاقتها في جزء الفيلم الواقع تحت الفتحة الموجودة في الحافظة وذلك حيث لا يحدث امتصاص لهذه الجسيمات وتصل إلى الفيلم الحساس فتترك فيه أثرها. أما إشعاعات جاما فتقاس في الجزء الموجود تحت النافذة المثبت عليها مرشح من الرصاص. حيث أن دور هذه القطعة هو إحداث أي من التأثير الكهروضوئي أو تأثير كومبتون أو إنتاج الأزواج في الرصاص، لتصل

هذه الإلكترونات إلى الفيلم الحساس وتترك أثرها عليه. وأما النيوترونات فيتم قياسها بمعرفة فرق العتامة بين الجزأين الموجودين تحت مرشح الرصاص السابق ومرشح آخر مكون من كل من الرصاص والكادميوم.



شكل (6-6)

أ- الفيلم الحساس

ب- الحافظة ذات النوافذ والغطاء

فالنيوترونات الحرارية تتفاعل مع مادة الكادميوم وينتج عن هذا التفاعل انطلاق إشعاعات جاما γ أي تفاعل (n , γ) ، وتؤدي إشعاعات جاما الصادرة عن هذا التفاعل إلى زيادة العتامة تحت المرشح المكون من الرصاص والكادميوم عن العتامة الناتجة تحت المرشح الرصاصي. كما يوجد في الحافظة مرشحان آخران مصنوعان من مادة البلاستيك نفسها، يبلغ سمك الأول 300 ميللي جرام/سم^2 وسمك الثاني 50 ميللي جرام/سم^2 . والغرض من هذين المرشحين تحديد الفرق في العتامة بين جزء الفيلم الموجود تحت الفتحة والجزء الموجود تحت المرشح 50 ميللي جرام/سم^2 بغرض معرفة طاقة جسيمات بيتا وإجراء تصحيحات الطاقة اللازمة. كذلك الأمر بالنسبة للمرشح البلاستيك الذي يبلغ سمكه 300 ميللي جرام/سم^2 فإنه يستخدم لتصحيح قيمة الجرعة من إشعاعات جاما كدالة من طاقتها.

وتحاط أطراف الحافظة وكذلك الفواصل بين المرشحات المختلفة بأسلاك أو فواصل من الرصاص، وذلك لإمكان تحديد وفصل المناطق المختلفة عن بعضها البعض. كذلك، يمكن أن توضع داخل الحافظة شريحة رقيقة من مادة الإنديوم. وتعمل هذه الشريحة كمقياس للتعرض في حالة الحوادث الإشعاعية. فإذا كانت الجرعة الفعالة من النيوترونات الحرارية أعلى من 10 ميللي سيفرت (أي أعلى من 1 رم) فإن هذه الجرعة كافية لتنشيط مادة الإنديوم وتحويلها إلى مادة مشعة تصدر جسيمات بيتا. ويمكن، بالتالي، قياس النشاط الإشعاعي (الشدة الإشعاعية) لشريحة الإنديوم باستخدام أحد الكواشف والعدادات وتحديد الجرعة الناتجة عن هذا التعرض.

6-5-2 مزايا وعيوب الأفلام الحساسة

تتميز الأفلام الحساسة كوسيلة لقياس الجرعة الشخصية الممتصة بعدة مزايا وعدة عيوب. **وأهم مزايا الأفلام الحساسة هي:**

أ- مرافقتها للشخص بصفة مستمرة حيث يثبتها الفرد على ملابسه وهي بذلك وسيلة دائمة لتسجيل الجرعات المتراكمة بالنسبة له.

ب- رخص ثمنها وعدم الحاجة إلى معرفة الشخص الذي يحملها بخصائصها الفنية.

ج- إمكان إعادة قراءتها في أي وقت عند حفظها حيث أن درجة العتامة لا تتغير بمرور الوقت وبذلك تعتبر وثيقة رسمية للتعرض.

ومن الجانب الآخر فإن للأفلام الحساسة بعض العيوب أهمها ما يلي:

أ- يستخدم الفيلم عادة لمدة طويلة (حوالي شهر أو أكثر)، ويتم إرساله بعد ذلك للإظهار والتثبيت والعد (أي قياس العتامة). لذلك، فإن تحديد قيمة الجرعة الممتصة لا يتم

إلا بعد مرور فترة طويلة (حوالي شهر) من بداية استخدام الفيلم، ويمكن أن يكون الشخص قد تعرض لجرعة أعلى من الحدود المسموح بها خلال هذه الفترة.

ب- قيمة الجرعة الممتصة لا تكون دقيقة وإنما تقريبية.

ج- ضرورة حفظ الأفلام بعيدا عن الحرارة والضوء وعدم حمل الشارة في الأماكن الدافئة كالسيارة مثلا حيث تتغير خصائص المستحلب الحساس.

د- عدم استخدام الفيلم الواحد لمدة طويلة (أكثر من شهر).

3-5-6 مقياس الجرعة بالوميض الحراري

The thermo-luminescent dosimeter (TLD)

يستخدم مقياس الجرعة بالوميض الحراري لتحديد الجرعات الإشعاعية التي تتراكم في الجسم وكذلك لتحديد معدل التعرض.

ويستخدم لهذا الغرض كاشف خاص هو عبارة عن مادة لافلزية متبلورة من فلوريد الليثيوم (LiF) أو فلوريد الكالسيوم (CaF). وعند سقوط الإشعاعات على مثل هذه المواد (المعروفة بالمواد الوماضة حراريا) تنتقل طاقة هذه الإشعاعات إلى إلكترونات البلورة، فتنتقل هذه الإلكترونات بالتالي إلى شريحة (band) أعلى للطاقة. ومن أهم خصائص المواد الوماضة الحرارية أن الإلكترونات التي تنتقل إلى شريحة أعلى تبقى في هذه الشريحة، طالما أن درجة حرارة المادة في حدود معينة. وعند تسخين المادة إلى درجة حرارة عالية (حوالي 200°م - 300°م) تعود الإلكترونات إلى شريحتها الأصلية مع انبعاث فرق الطاقة بين الشريحة الأعلى والشريحة الأدنى في شكل ومضة ضوئية مرئية. وتتناسب كمية الضوء الصادر من المادة عند تسخينها مع كمية الطاقة الممتصة من الإشعاعات الساقطة. لذلك، فإنه عند قياس كمية الضوء الصادر بأي من الوسائل المعروفة (أنبوب التضاعف الضوئي مثلا) يمكن تحديد الجرعة الإشعاعية الممتصة. وعند تبريد المادة بعد تسخينها تصبح صالحة لإثارة إلكتروناتها من جديد وتستخدم بالتالي مرة أخرى كمقياس للجرعة.

وتتميز مادة فلوريد الكالسيوم بحساسية شديدة للإشعاعات. إلا أن استجابتها لتغير طاقة الإشعاعات تعتبر ضعيفة. وأما مادة فلوريد الليثيوم فتتميز باستجابة عالية للطاقة رغم أن حساسيتها ضعيفة.

ومن أهم مزايا مقاييس الجرعة بالوميض الحراري ما يلي:

أ- إعادة استخدامها بعد التبريد.
ب- سهولة تحديد الجرعة الإشعاعية بصفة دورية، فالأمر لا يحتاج إلا لتوفر فرن حراري (تصل درجة الحرارة فيه حتى 250°م) وجهاز لقياس كمية الضوء الصادرة.
ج- استجابتها للطاقة في مدى واسع لتغير طاقة الإشعاعات الساقطة بالمقارنة بالفيلم الحساس.
د- إمكانية استخدامها لعدة أسابيع متصلة دون قراءة حيث أنها لا تفقد الطاقة المختزنة فيها إلا بالتسخين.
هـ- عدم الحاجة إلى معرفة النواحي الفنية الخاصة بها من قبل الشخص الذي يستخدمها.

إلا أن من أهو عيوب هذا النوع من مقاييس الجرعة ما يلي:

أ- زيادة التكلفة بالمقارنة بالأفلام الحساسة.
ب- عدم إمكانية حفظ مقدار الجرعة الممتصة وذلك لضياع المعلومات المختزنة فيها بمجرد التسخين وقياس كمية الضوء الناتج وتسجيله.

وفي السنوات الأخيرة انتشر استخدام مقاييس الجرعة بالوميض الحراري في العديد من المختبرات وحلت هذه الوسيلة محل الأفلام الحساسة أو كوسيلة إضافية لتحديد الجرعة الشخصية التي يتعرض لها العامل خلال فترات زمنية قصيرة (بصفة يومية أو أسبوعية أو شهرية أو أطول، تبعا للجرعة الفعالة المتراكمة). أما شارة الفيلم فكانت تستخدم، عادة، لتعيين الجرعات الإشعاعية المتراكمة لمدة طويلة (لمدة شهر تقريبا).

6-5-4 ألواح أثر النيوترونات السريعة
Fast neutron track plates

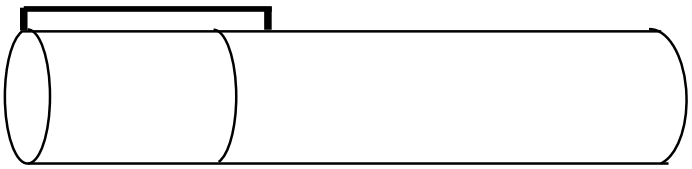
ألواح أثر النيوترونات السريعة عبارة عن فيلم حساس من نوع خاص موضوع داخل حافظة (أو ماسك)، وهي تشبه إلى حد كبير مقياس الجرعة ذي الفيلم الحساس. ويستخدم هذا المقياس لتحديد الجرعة الشخصية للنيوترونات السريعة، حيث تتفاعل هذه النيوترونات مع المادة الحساسة للفيلم وينتج عن هذا التفاعل خروج بروتونات. وتقوم هذه البروتونات بتأيين مادة المستحلب الحساسة ويظهر أثر البروتون عند إظهار وتثبيت الفيلم. ويتم قياس عدد هذه الآثار باستخدام ميكروسكوب خاص. ويعتبر عدد الآثار في 1سم^2 بمثابة مقياس للجرعة الإشعاعية الناتجة عن النيوترونات السريعة.

ويمكن استخدام هذا المقياس لقياس جرعات إشعاعية من النيوترونات السريعة يتراوح مقدارها بين 1 ميللي سفرت، 1 سيفرت. ومن أهم عيوب هذا المقياس صعوبة عملية عد الآثار تحت الميكروسكوب والتكلفة الكبيرة – نسبيا – لهذه العملية. وفضلا عن ذلك، فإن هذا النوع من الأفلام يعتبر حساسا بالنسبة لإشعاعات جاما. فعند امتصاصها لجرعة إشعاعية من إشعاعات جاما في حدود 100 ميللي سيفرت تصبح عملية عد الآثار النيوترونية مستحيلة نظرا لحدوث خلفية شديدة العتامة في الفيلم كله بسبب إشعاعات جاما.

6-5-5 مقياس الجرعة الجيبي The pocket dosimeter

مقياس الجرعة الجيبي هو عبارة عن وسيلة لقياس التعرض الشخصي (بالرينتجن). ويشبه هذا المقياس (شكل 6-7) قلم الحبر من حيث الشكل والحجم. ويتركب من غرفة اسطوانية صغيرة تحتوي على قطبين أحدهما مثبت والآخر متحرك. ويصنع القطب المتحرك من خيط رفيع من مادة الكوارتز . وعند شحن القطبين بشحنة كهربية من

نفس النوع يتنافر القطبان فيبتعد القطب المتحرك بعيدا بفعل قوة التنافر. وعند سقوط الإشعاعات داخل غرف التأين وخاصة إشعاعات جاما أو الإشعاعات السينية تؤدي هذه الإشعاعات إلى تأيين الغاز داخل الغرفة. ونتيجة للشحنة المتكونة من التأين تقل الشحنة على كل من القطبين فتقل قوة التنافر بينهما مما يؤدي إلى تحرك خيط الكوارتز الرفيع من إلى وضعه الطبيعي. بذلك، يشبه عمل هذا المقياس جهاز قياس الشحنة الكهربائية، ولذلك يطلق عليه اسم مقياس الكهرباء ذات الخيط الكوارتزي.



شكل (6-7)
مقياس الجرعة الجيبي

ولإمكان قراءة قيمة التعرض في أي وقت تصنع إحدى قواعد الأسطوانة من الزجاج الشفاف، وذلك للسماح لدخول الضوء منها وتصنع القاعدة الأخرى من مادة شفافة، يوجد عليها تدريج (يحدد مقدار التعرض بالرينتجن أو أجزائه)، ومركب عليها عدسة لتكبير هذا التدريج لإمكان تحديد القراءة بدقة. وتتم قراءة المقياس بتوجيهه نحو الضوء والنظر من خلال العدسة فيظهر ظل خيط الكوارتز فوق التدريج. وبذلك، يمكن تحديد التعرض مباشرة وفي أي وقت.

ويتم شحن المقياس باستخدام منبع جهد (يبلغ جهده 1.5 فولت)، إلى أن يصبح خيط الكوارتز أبعد ما يكون عن الخيط الثابت، وتكون هذه القراءة هي القراءة الصفرية. وعند تعرض الغرفة للإشعاعات يتحرك الخيط إلى وضعه الطبيعي مبينا مقدار التعرض.

وتوجد أنواع مختلفة من هذه الأفلام تتراوح حساسيتها بين 1 ميللي سيفرت وحوالي 100 سيفرت. وتجدر الإشارة إلى أن بقاء هذا المقياس مدة طويلة من الزمن (عدة أشهر) يؤدي إلى تسرب الشحنة التي شحن بها ويعطي بذلك قراءة للتعرض دون حدوث أي تعرض. لذلك، فإنه يجب معرفة مقدار التسرب الأسبوعي في حالة عدم التعرض وذلك بغرض تحديد التعرض الفعلي للإشعاعات.

6-6 أسئلة للمراجعة

1- اذكر أهم المتطلبات التي يجب توفرها في أجهزة المسح الإشعاعي.

2- ما هي الأجزاء الأساسية التي يتكون منها جهاز المسح الإشعاعي للإشعاعات المختلفة؟.

3- ما هي أهم مزايا أجهزة المسح الإشعاعي التي تستخدم غرف التأين؟.

4- قارن بين أجهزة المسح الإشعاعي التي تستخدم غرفة تأين أو عداد غايغر ككاشف للإشعاعات.

5- اشرح بالتفصيل مكونات مقياس التعرض، ودور كل من هذه المكونات واشرح كيفية عمله.

6- اذكر مكونات مقياس معدل التعرض ودور كل من هذه المكونات واشرح كيفية عمله.

7- لماذا تجب معايرة أجهزة المسح الإشعاعي؟، وكيف يمكن تنفيذ المعايرة ؟.

8- ما هي مكونات جهاز رصد التلوث؟، وما هي أهم الفروق بينه وبين جهاز المسح الإشعاعي؟.

9- اشرح تركيب شارة الفيلم الحساس، وما هو الغرض من الفتحات المختلفة ؟.

10- كيف يمكن استخدام شارة الفيلم الحساس لقياس الجرعة الممتصة للإشعاعات المختلفة؟.

11- ما هي أهم مزايا وعيوب شارة الفيلم الحساس؟.

12- كيف تستخدم ألواح الأثر النيوتروني للكشف عن النيوترونات السريعة وتقدير جرعتها؟.

13- ما هو مبدأ عمل مقياس الجرعة الوماض حراريا؟، اذكر مزايا وعيوب هذا المقياس.

14- صف تركيب مقياس الجرعة الجيبي، وكيف يستخدم لقياس الجرعات الشخصية؟.

15- قارن بين كل من مقياس الجرعة الجيبي والحراري الوماض وشارة الفيلم الحساس.

الفصل السابع

وحدات قياس الجرعات الإشعاعية
Units of radiation dosimetery

-مقدمة – كثافة تدفق الإشعاعات – التعرض – الجرعة الإشعاعية – التكافؤ بين الرينتجن والراد – التأثير البيولوجي داخل جسم الإنسان – معدل الجرعة – أسئلة ومسائل

7 –1 مقدمة

عند سقوط كمية من الإشعاعات الضوئية أو الحرارية على مادة ما تنتقل طاقة هذه الإشعاعات إلى المادة فتزداد درجة حرارتها. أما بالنسبة للكائنات الحية (بما فيها الإنسان) فلا ترتفع درجة حرارتها نظرا لقيام جسم الكائن الحي بفقد هذه الطاقة الممتصة في تبخير الماء من الجسم، فتبقى درجة حرارته ثابتة. ومع ذلك، يحس الإنسان بالإشعاعات الضوئية والحرارية، وبذلك يستطيع تفاديها بالابتعاد عن مصادرها. أما بالنسبة للإشعاعات المؤينة فلا تحس بها الكائنات الحية على الإطلاق، وذلك نظرا لقدرتها العالية على اختراق جسم الكائن الحي وفقدها طاقتها عن طريق تأيين جزيئات الماء الموجودة في الجسم. فعند تعرض جسم الكائن لكمية من الإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما أو الجسيمات النووية فإنه لا يحس بها في حينه، مهما زادت كميتها.

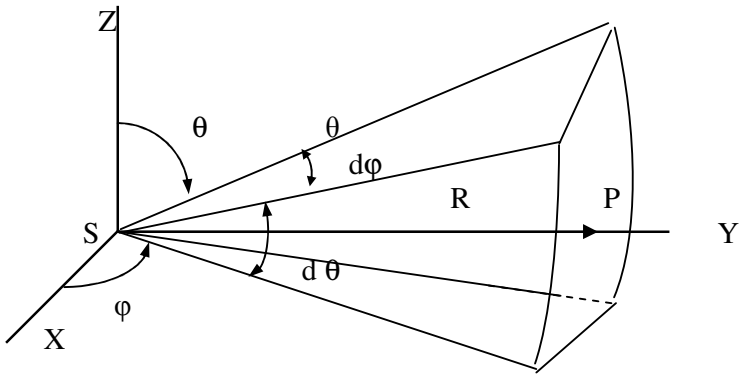
لذلك، فإنه لوقاية الكائنات الحية عموما – بما فيها الإنسان – من التعرض للإشعاعات المؤينة يجب الكشف عن وجودها وتحديد كمياتها ومستوياتها الإشعاعية في جميع الأماكن التي يمكن أن توجد فيها. ويختص هذا الفصل بالتعرف على الوحدات المستخدمة لقياس كميات الإشعاعات (المستويات الإشعاعية) والجرعات الإشعاعية.

7-2 كثافة تدفق الإشعاعات (أو معدل سيولة الإشعاعات)

Radiation flux density (or fluence rate)

كثافة التدفق للجسيمات النووية أو الإشعاعات عند نقطة ما هو عبارة عن عدد الجسيمات المارة خلال مساحة قدرها 1 سم^2 (وحدة المساحات) في الثانية عند هذه النقطة. ويمكن حساب كثافة التدفق للمصادر المشعة ذات الأشكال المختلفة. فإذا كان حجم المصدر صغيرا بالنسبة للمسافة حتى النقطة المطلوب تحديد كثافة التدفق عندها فإنه يمكن اعتبار هذا المصدر نقطيا (أي علي شكل نقطة مادية صغيرة). ويوضح شكل (7-1) كيفية حساب كثافة التدفق ϕ الناتج عن مصدر نقطي نشاطه الإشعاعي S عند نقطة ما P تبعد مسافة R عن مركز المصدر S ، وبحيث تكون هذه المسافة R أكبر بكثير من نصف قطر المصدر. فكثافة التدفق عندما يوضع المصدر في مركز كرة يمر سطحها بالنقطة P هي عبارة عن:

$$\phi = S / A \qquad (7\text{-}1)$$



شكل (7-1)
كيفية حساب كثافة التدفق عند نقطة P من مصدر نقطي

حيث S شدة المصدر (بوحدة جسيم/ثانية)، A مساحة سطح الكرة التي يكون المصدر في مركزها ونصف قطرها R. وحيث إن مساحة سطح الكرة التي نصف قطرها R هي:

$$A = 4 \pi R^2$$

تكون كثافة التدفق ϕ (بوحدة جسيم/سم^2.ثانية) هي:

$$\phi = S / 4 \pi R^2 \qquad (7\text{-}2)$$

أي أن كثافة التدفق ϕ عند نقطة معينة تتناسب تناسبا طرديا مع شدة المصدر S وعكسيا مع مربع المسافة R حتى النقطة المعينة. وتجدر الإشارة إلى أنه وفقا للوحدات المعيارية العالمية الجديدة (SI) يطلق الآن على كثافة تدفق الجسيمات مصطلح جديد هو "معدل سيولة الجسيمات أو الفوتونات".

وتعرف هذه العلاقة الأخيرة بقانون التربيع العكسي لمعدل سيولة الجسيمات (أو لكثافة التدفق) من مصدر نقطي.

ويمكن إيجاد معدل سيولة الجسيمات الناتجة عن المصادر ذات الأشكال المختلفة كالمصادر الممتدة طوليا أو مساحيا أو حجما.

وفي كثير من الأحيان يصدر المصدر أنواعا مختلفة من الإشعاعات، أو يصدر إشعاعات من نفس النوع ولكن بطاقات مختلفة. عندئذ، يجب تعيين معدل سيولة (كثافة تدفق) الجسيمات أو الإشعاعات للأنواع المختلفة. وأحيانا يستخدم مصطلح آخر يعرف بكثافة تدفق الطاقة (energy flux density). وتعرف كثافة تدفق الطاقة على أنها كمية الطاقة المارة خلال وحدة المساحات في الثانية الواحدة عند النقطة المعينة. ولتحديد كثافة تدفق الطاقة، فإنه يجب معرفة كثافة تدفق الإشعاعات وطاقاتها. فإذا كان لهذه الإشعاعات نفس مقدار الطاقة E تكون كثافة تدفق الطاقة Φ هي عبارة عن:

$$\Phi = E \phi \qquad (7\text{-}3)$$

أما عند اختلاف طاقة الجسيمات فإنه يمكن تحديد كثافة تدفق الطاقة كالآتي:

$$\Phi = \int_{0}^{Emax} \phi \, dE \qquad (7\text{-}4)$$

وتجدر الإشارة إلى أن المصطلح المعياري العالمي الجديد لكثافة تدفق الطاقة أصبح هو معدل سيولة الطاقة (Energy fluence rate) .

3-7 التعرض The exposure

يستخدم مصطلح التعرض ليدل على مفهومين، أحدهما عام والآخر فيزيائي. وبالمفهوم العام، يستخدم مصطلح التعرض للدلالة على التعرض للإشعاعات المؤينة. وبهذا المفهوم قد يكون التعرض خارجيا (external exposure)، أي ناتجا عن مصدر مشع موجود خارج الجسم، وقد يكون داخليا (internal)، أي ناتجا عن اندخال مادة مشعة داخل الجسم. وبهذا المفهوم أيضا، قد يوصف التعرض بالمهني (occupational) أي تعرض الأشخاص الذين يمتهنون العمل بالإشعاعات المؤينة، أو بالطبي (medical exposure) ، أي تعرض المرضى بهدف تشخيص أمراضهم أو علاجها. كذلك، قد يوصف التعرض بالعادي (normal) وهو التعرض الذي يحدث في ظروف التشغيل العادية للمصادر والمواد المشعة، كما يمكن أن يوصف بالكامن (potential exposure) أي التعرض الذي قد ينتج عن ظروف حوادث إشعاعية. وفضلا عن ذلك، قد يوصف التعرض بالحاد (acute exposure) وهو ذلك التعرض الذي يودع كمية هائلة من الإشعاعات في المتعرض خلال فترة زمنية قصيرة (دقائق أو ساعات أو حتى أيام قليلة)، وقد يوصف بالمزمن (chronic exposure) وهو ذلك التعرض الذي يودع كميات قليلة من الإشعاع ولكن خلال فترة زمنية طويلة (تمتد لعدة سنوات مثل تعرض العاملين المهنيين).

أما المفهوم الفيزيائي للتعرض فيقصد به كمية الإشعاعات المؤينة التي يتكبدها عضو أو نسيج من أعضاء أو أنسجة الكائن الحي، أو يتعرض لها جسمه ككل. فعند تعرض الخلايا الحية للإشعاعات المؤينة تمتص هذه الخلايا جزءا من الطاقة التي تحملها هذه الإشعاعات، وربما الطاقة كلها. وهذه الطاقة الممتصة داخل الخلايا هي التي تؤدي إلى تلفها. وتجدر الإشارة إلى أن التعريف التاريخي الدقيق للتعرض،

بالمفهوم الفيزيائي، هو تعرض الهـواء الجـاف للأشـعة السـينية أو إشعاعات جاما منخفضة الطاقة (حتى 3 ميغا إلكتـرون فولـت) عنـد الظروف المعيارية للضغط الجوي ودرجة الحرارة.

وأنسب طريقة لقياس كمية الإشعاعات التي يتعرض لهـا جسـم الكائن الحي (أي التعرض) هي قياس الشحنة الكهربية الناتجة عن تأين الهواء في هذه الظروف. لذلك، فقد اتفق على اعتبار التعرض هو عبارة عن كمية التأين الناتجة عن الإشعاعات السينية أو إشعاعات جامـا فـي وحدة الحجوم (أي 1 سم ^{3}) من الهواء الجاف عند الظروف الجويـة المعيارية (أي عند درجة حرارة صفر مْ وعند ضـغط مقـداره 760 ملليمتر زئبق).

وحدة قياس التعرض – الرينتجن Roentgen (R)

يقاس التعرض بوحدة تعـرف بـالرينتجن (Roentgen) تخليـدا لذكرى العالم الذي اكتشف الأشعة السينية. وتستخدم هذه الوحدة لقيـاس مقدار الطاقة الإشعاعية التي تنتقل من الكمية المحددة من الأشعة السينية أو إشعاعات جاما ذات الطاقة المنخفضة.

وقد تم تعريف الرينتجن (R) ، في أول الأمر على أنـه كميـة الإشعاعات السينية (أي التعرض) التي تؤدي إلى إنتاج شحنة كهربائية (سالبة أو موجبة) مقدارها وحدة واحدة كهروستاتيكية (1 esu) في اسم^3 من الهواء الجاف عند الظروف الجوية المعيارية، أي أن:

$$1\ R = 1\ esu / cm^3 air \qquad (7\text{-}5)$$

وحيث إن كافة الهواء عند الظروف المعيارية هـي 0.001293 جم/سم^3 ، وأن الوحدة الكهروسـتاتيكية مرتبطـة بوحـدة الكولـوم C بالعلاقة:

$$1\ esu = 1 / (3 \times 10^9)\ Coulomb \qquad (7\text{-}6)$$

فقد أصبح تعريف الرينتجن R طبقا لنظام الوحـــدات المعياريـــة الدولية (SI) هو:

$$1\ R = 1x\ (1\ /3x10^{9}) \div 0.001293$$
$$= 2.58 \times 10^{-7} \quad \text{Coulomb/gram}$$

أي أن:

$$1\ R = 2.58\ X\ 10^{-4} \quad \text{Coulomb/kg} \quad (7\text{-}7)$$

أي أن الرينتجن هو التعرض الذي يـــؤدي إلـــى إنتـــاج شـــحنة كهربائية موجبة أو سالبة مقدارها 2.58×10^{-4} كولوم في كل ا كجـــم من الهواء الجاف عند الظروف الجوية المعياريـــة. وحيـــث أن شـــحنة الإلكترون أو الأيون تساوي 1.6×10^{-19} كولوم فإن هـــذا يعنـــي أن الرينتجن الواحد ينتج عددا من الأزواج الإلكترونية الأيونية n مقداره:

$$n = 2.58 \times 10^{-4} / 1.6 \times 10^{-19}$$
$$= 1.61 \times 10^{15} \quad \text{electron-ion pairs / kg air}$$

في كل كيلوجرام من الهواء الجاف في الظروف المعيارية.

وحيث أن الطاقة اللازمة لإنتاج زوج إلكتروني – أيوني واحـــد في الهواء الجاف هي حوالي 34 إ.ف، تكون كمية الطاقة التي تودع في الهواء لتكوين زوج واحد هي:

$$\varepsilon = 34 \times 1.6 \times 10^{-19}$$
$$= 5.44 \times 10^{-18} \quad \text{Joules}$$

بذلك، تكون الطاقة بالجول المنقولة من الإشعاعات إلـــى كجـــم واحد من الهواء الجاف نتيجة تعرض بمقدار 1 رينتجن هي:

$$E = \varepsilon \times n$$
$$= 5.44 \times 10^{-18} \times 1.61 \times 10^{15}$$
$$= 0.00876 \quad (\text{joules/ kg})$$

وعلى الرغم من أن وحدة الرينتجن مازالت مستخدمة في بعض الأحيان، إلا أن الوحدة ليست كافيـــة لأنهـــا لا تنطبـــق ســـوى علـــى

الإشعاعات السينية وإشعاعات جاما منخفضة الطاقة عند مرورها في الهواء الجاف دون غيره.

ولما كان الهدف الرئيس هو وقاية جسم الإنسان والكائنات الحية الأخرى من الإشعاعات المؤينة، ونظرا لاختلاف امتصاص الطاقة في أنسجة الجسم عنه في الهواء، فإنه يجب إيجاد العلاقة التي تحول التعرض (أي تعرض الهواء الجاف) إلى ما يكافئه من تعرض الأنسجة البشرية. وقد وجد أن الطاقة الممتصة في الجسم البشري عن تعرض مقداره 1 رينتجن هي 0.0096 جول/كجم. لذلك، فإنه عند الحاجة لتحويل التعرض إلى ما يكافئه من جرعة للإنسان يجب أن تؤخذ النسبة (0.0096 : 0.00876) في الحسبان.

7-4 الجرعة الإشعاعية الممتصة

The radiation absorbed dose

نظرا لأن مفهوم التعرض قاصر على الأشعة السينية وإشعاعات جاما منخفضة الطاقة وعلى الهواء الجاف كوسط تنتقل إليه طاقة الإشعاعات، ورغم وجود معامل تحويل من طاقة منقولة للهواء إلى طاقة منقولة للجسم البشري، فقد تم استخدام كمية فيزيائية جديدة تعبر عن انتقال الطاقة من جميع أنواع الإشعاعات وعند جميع طاقاتها، ولجميع أنواع المواد المتعرضة لهذه الإشعاعات. وتعرف الكمية الجديدة باسم الجرعة الإشعاعية الممتصة.

والجرعة الممتصة هي عبارة عن كمية الطاقة التي تنتقل من الإشعاعات المؤينة للجسم المعين. ويستخدم هذا المصطلح لجميع أنواع الإشعاعات والطاقات ولجميع الأجسام والمواد. ولقد استخدمت في أول الأمر وحدة لقياس الجرعة الممتصة تعرف بالراد (Radiation absorbed dose- rad).

7-4-1 الراد الوحدة القديمة لقياس الجرعة الممتصة The rad

يعرف الراد على أنه عبارة عن انتقال كمية من الطاقة مقدارها 100 إرغ لكل جرام من المادة الممتصة، عند مرور الإشعاعات فيهـــا، أي أن:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} / 1 \text{ gm matter} \qquad (7\text{-}8)$$

وحيث أن: 1 إرج = 10^{-7} جول، فإن:

$$1 \text{ rad} = 100 \times 10^{-7} / 10^{-3}$$
$$= 0.01 \text{ joule / kg}$$

7-4-2 الغراي وحدة الجرعة الممتصة في النظام المعياري
The Gray (Gy)

طبقا لنظام الوحدات المعيارية الدولية (SI) فقد استخدمت وحـــدة جديدة لقياس الجرعة الممتصة هي غراي (Gray - Gy) نسبة إلى العـــالم الفيزيائي غراي الذي كان أول من أوجد الطرق العلمية الدقيقة لقيـــاس الجرعة الممتصة. والغراي هو جرعة من الطاقة الممتصـــة مقـــدارها واحد جول لكل كغم من المادة، أي أن: 1 جراي = 1جول لكل كغم من المادة

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \qquad (7\text{-}9)$$

7-5 التكافؤ بين الرينتجن والراد

تجدر الإشارة إلى أنه في معظم الأحيان يتم تدريج أجهزة قياس الجرعات بوحدات الرينتجن، وذلك بغرض قيـــاس التعـــرض. كـــذلك، يلاحظ أن العديد من جداول الجرعات موضوعة بوحدات الراد. لـــذلك، يجب معرفة علاقات التكافؤ بين هاتين الوحدتين لإجـــراء التحـــويلات اللازمة من قراءة الجهاز بالرينتجن إلى قيمة الجرعة الممتصة بالراد أو الغراي.

وقد ذكرنا أن تعرضا مقداره واحد رينتجن يكافئ جرعة ممتصة مقدارها 0.00876 جول/كغم من الهواء، أو يكافئ 0.0096 جول/كغـــم

من جسم الإنسان. ولما كان الراد هو 0.01 جول/كغم من المادة، فإنه يلاحظ أن:

1 رينتجن في الهواء يكافئ 0.876 راد = 0.00876 غراي

1 رينتجن في الإنسان يكافئ 0.96 راد = 0.0096 غراي

وتبين العلاقة الأخيرة أن تعرضا مقداره 1 رينتجن يكافئ بالنسبة لجسم الإنسان 1 راد تقريبا. ولكن يجب أن يؤخذ في الحسبان أن الرينتجن قد حدد أساسا بالنسبة للإشعاعات السينية وإشعاعات جاما، أما الراد فيشمل جميع أنواع الإشعاعات.

7-6 التأثير البيولوجي على جسم الإنسان

Biological effects on the human body

لقد تبين أن التأثير البيولوجي على جسم الإنسان، الناتج عن نفس مقدار الجرعة الممتصة يختلف اختلافا شديدا باختلاف نوع الإشعاعات. فمثلا يلاحظ أن التأثير البيولوجي الناتج عن جرعة مقدارها 1 غراي (100 راد) من النيوترونات السريعة أكبر بمقدار عشرين مرة من التأثير الناتج عن الجرعة نفسها من الأشعة السينية .لذلك، فإنه يجب معرفة ما يسمى بالتأثير البيولوجي النسبي.

7-6-1 التأثير البيولوجي النسبي (RBE)

هو عبارة عن نسبة الجرعة الممتصة من إشعاعات جاما عند طاقة معينة، إلى الجرعة الممتصة من أي نوع آخر من الإشعاعات بحيث يكون التأثير البيولوجي عنهما واحدا في نفس العضو. فعلى سبيل المثال، إذا كان التأثير الناتج عن جرعة مقدارها 0.2 غراي (20 راد) من النيوترونات البطيئة في عضو ما يعادل تماما التأثير الناتج عن جرعة مقدارها 1.0 غراي (100 راد) من إشعاعات جاما عند الطاقة المعينة يكون مقدار التأثير البيولوجي النسبي Relative biological effectiveness (RBE) هو:

$$RBE = 1/0.2 = 5$$

أي أن التأثير البيولوجي للنيوترونات البطيئة أقوى خمس مرات من تأثير إشعاعات جاما على نفس العضو.

ويختلف التأثير البيولوجي النسبي للإشعاعات باختلاف طاقتها وباختلاف نوع ودرجة التلف البيولوجي الناتج عنها، وكذلك باختلاف نوع النسيج أو العضو. لذلك، فإنه لأغراض الوقاية الإشعاعية استخدمت في الماضي كمية أخرى عرفت باسم معامل النوعية (The quality factor Q) بدلا من التأثير البيولوجي النسبي RBE. إلا إن هذه الكمية الجديدة استبدلت بكمية أحدث منذ عام 1991 م ، تعرف باسم العامل المرجح (أو الوزني) للإشعاع وتتواءم مع المفاهيم الفيزيائية والإحصائية الأساسية.

7-6-2 العامل المرجح للإشعاع W_R

The radiation weighting factor

أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) في نشرتها الأخيرة الصادرة في يناير عام 1991 م، باستخدام مصطلح العامل المرجح (أوالوزني) للإشعاع W_R بدلا من معامل النوعية المستخدم سابقا، حيث ارتبط معامل النوعية بأنه متوسط التأثيرات البيولوجية النسبية على الجسم كله عندما تؤثر الإشعاعات في نقط محددة من كل عضو أو نسيج. أما العامل المرجح للإشعاع فقد أخذ في الحسبان الجرعة الممتصة المتوسطة في كامل العضو أو النسيج. ويبين جدول (7-1) قيم العامل المرجح للإشعاع W_R لبعض الإشعاعات عند طاقات مختلفة.

جدول(7-1)
قيم العامل المرجح للإشعاع W_R للإشعاعات والطاقات المختلفة

نوع الإشعاعات وطاقاتها	قيمة العامل المرجح للإشعاع W_R
الأشعة السينية وأشعة جاما (جميع الطاقات)	1
الإلكترونات والميونات(جميع الطاقات)	1
النيوترونات:	

– بطاقة أقل من 10 ك.إ.ف	5
– بطاقة من 10 حتى 100 ك.إ.ف	10
– بطاقة من 100 حتى 2000 ك.إ.ف	20
– بطاقة من 2 وحتى 20 م.إ.ف	10
– نيوترونات بطاقة أكبر من 20 م.إ.ف	5
البروتونات (بخلاف المرتدة)بطاقة حتى 2م.إ.ف.	10
جسيمات ألفا وشظايا انشطار ونوى ثقيلة	20

7-6-2 الجرعة المكافئة للعضو أو النسيج H_T

The tissue equivalent dose

مع استخدام العامل المرجح للإشعاع W_R بدلا من معامل النوعية Q ، أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية باستخدام مصطلح الجرعة المكافئة للعضو أو النسيج (The equivalent dose in tissue or organ) بدلا من مكافئ الجرعة للإنسان (Dose equivalent man) المستخدم سابقا.

وتحدد الجرعة المكافئة H_T لعضو أو نسيج T من أنسجة الجسم البشري من العلاقة التالية:

$$H_T = \sum_R W_R D_{TR} \qquad (7\text{-}10)$$

حيث: D_{TR} الجرعة الممتصة من النوع المعين من الإشعاعات R في النسيج أو العضو المعين T . ويتم جمع الجرعات المكافئة في النسيج المعين من الإشعاعات المختلفة للحصول على الجرعة المكافئة الكلية في هذا النسيج H_T .

7-6-4 وحدات قياس الجرعة المكافئة

تقاس الجرة المكافئة في عضو أو نسيج بوحدتي رم (rem) في النظام القديم أو بوحدة سيفرت (Sievert Sv) في النظام المعياري الدولي. فعند استخدام النظام المعياري للوحدات (SI) تقاس الجرعة الممتصة بالغراي (Gy)، وعندئذ تقاس الجرعة المكافئة في العضو أو النسيج

بوحدة سيفرت (Sv). أما عند استخدام وحدة راد (rad) التقليدية لقياس الجرعة الممتصة، عندئذ تقاس الجرعة المكافئة بوحدة رم (rem).

وحدة رم Roentgen equivalent man (The rem)

هي الوحدة القديمة لقياس الجرعة المكافئة في نسيج، حيث يعبر عن الجرعة الممتصة بوحدة راد. وتكون الجرعة المكافئة بوحدة رم (rem) هي مجموع حاصل ضرب العامل المرجح للإشعاع في الجرعة الممتصة بوحدة راد طبقا للعلاقة (7−10):

وحدة سيفرت The Sievert (Sv)

هي وحدة قياس الجرعة المكافئة في النظام المعياري الدولي للوحدات، حيث تكون الجرعة المكافئة بوحدة سيفرت عندما يتم التعبير عن الجرعة الممتصة في العلاقة (7−10) بوحدة غراي (Gy).

مثال :

في إحدى السنوات تعرضت رئتا أحد العاملين في مختبر نووي للجرعات التالية: 0.02 غراي (2 راد) نيوترونات حرارية (أي بطاقة أقل من 10 ك.إ.ف)، 0.05 غراي (5 راد) نيوترونات بطاقة 14 م.إ.ف ، 0.8 غراي (80 راد) إشعاعات جاما. احسب الجرعة المكافئة في رئتي هذا العامل عن تلك السنة.

الحل :

بتطبيق العلاقة (7−10) وإيجاد العامل المرجح للإشعاع للأنواع الثلاثة من جدول (7−1)، والتعبير عن الجرعة الممتصة بوحدة غراي نحصل على الجرعة المكافئة بوحدة سيفرت كالآتي:

$$H = \sum W_R H_{TR}$$

$$H = 5 \times 0.02 + 10 \times 0.05 + 1 \times 0.8$$

$$= 0.1 + 0.5 + 0.8$$

$$= 1.4 \quad (Sv)$$

أي أن الجرعة المكافئة في رئتي العامل = 1.4 سيفرت

وعند التعبير عن الجرعة الممتصة بوحدة راد نحصل على الجرعة المكافئة في الرئتين بوحدة رم كالآتي:

$$H = 5 \times 2 + 10 \times 5 + 1 \times 80$$
$$= 10 + 50 + 80$$
$$= 140 \quad (rem)$$

أي أن الجرعة المكافئة في رئتي العامل = 140 رم.

وباستخدام العلاقة بين الغراي والراد (العلاقة 7-9) يتضح أن العلاقة بين السيفرت والرم هي:

1 سيفرت = 100 رم

وهي العلاقة التي أوضحها المثال السابق.

7-6-3 العامل المرجح للنسيج أو العضو W_T

The tissue weighting factor

يعتمد احتمال الإصابة بالتأثيرات العشوائية للإشعاع (كالسرطان أو التأثيرات الوراثية) على نوع العضو أو النسيج المتعرض للإشعاع. فبعض الأعضاء والأنسجة البشرية تتعرض للإصابة السرطانية الناتجة عن الإشعاع أكثر من غيرها عند تساوي مقدار الجرعة المكافئة. ولحساب احتمال إصابة الجسم البشري بهذه التأثيرات فإنه يجب تحديد مدى إسهام كل عضو من أعضاء وأنسجة الجسم في هذا الاحتمال عند تساوي الجرعات في هذه الأعضاء. ولعمل ذلك فإنه يجب وزن الجرعات المكافئة للأنسجة والأعضاء البشرية بمعامل خاص يطلق عليه اسم العامل المرجح للنسيج أو العضو أو العامل المرجح للنسيج The tissue weighting factor W_T . ويمثل هذا العامل الإسهام النسبي للنسيج أو العضو (أي عامل النسيج المرجح) في الضرر الإجمالي للجسم، من بين التأثيرات الناجمة عن تشعيع كامل الجسم تشعيعا متجانسا. بمعنى آخر، فإنه عند تشعيع الجسم البشري بشكل متجانس بالإشعاع يكون العامل المرجح للنسيج أو العضو هو نسبة إسهام هذا العضو في احتمال

الإصابة بالتأثير العشوائي. ويبين جدول (7-2) قيم العوامل المرجحة للأنسجة المختلفة للجسم البشري.

7-6-3 الجرعة الفعالة E

The effective dose

أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية باستخدام مصطلح الجرعة الفعالة E بدلا من المصطلح المتداول قبله وهو مكافئ الجرعة الفعالة. وترتبط الجرعة الفعالة بالتأثيرات العشوائية على كامل الجسم البشري بعد وزن الجرعات المكافئة للأعضاء، طبقا لإسهامها في الضرر العشوائي على كامل الجسم، أي أن الجرعة الفعالة هي مجموع حاصل ضرب الجرعة المكافئة لكل نسيج أو عضو في قيمة العامل المرجح لهذا النسيج أو العضو طبقا للعلاقة التالية:

$$E = \sum_{T} W_T H_T \qquad (7\text{-}11)$$

حيث: W_T هو العامل المرجح للنسيج T ، H_T هي الجرعة المكافئة في النسيج T ، ويتم جمع إسهامات جميع أنسجة وأعضاء الجسم البشري.

جدول(7-2): قيم العوامل المرجحة W_T لأعضاء الجسم البشري

العضو أو النسيج	قيمة المعامل المرجح W_T
الغدد التناسلية	0.20
النخاع العظمي	0.12
القولون	0.12
الرئتين	0.12
المعدة	0.12
المثانة	0.05
الكبد	0.05
الإثنى عشر	0.05
الغدد الدرقية	0.05
الصدر (الثدي)	0.05
الجلد	0.01
سطح العظام	0.01

باقي الأعضاء	0.05
كامل الجسم	1.00

وحدات قياس الجرعة الفعالة

تقاس الجرعة الفعالة E بنفس الوحدات المستخدمة لقياس الجرعة المكافئة، وهي السيفرت في النظام المعياري الدولي والرم في نظام الوحدات القديمة.

مثال:

تعرضت أنسجة وأعضاء أحد فنيي المختبرات الطبية، التي يتم فيها تداول المواد المشعة، خلال عام بسبب اندخال المواد المشعة وبسبب التعرض الخارجي إلى الجرعات التالية: 150 ميللي رم (1.5 ميللي سيفرت) للرئتين، 500 ميللي رم (5 ميللي سيفرت) للمعدة، 100 ميللي رم (1 ميللي سيفرت) للاثنى عشر، 250 ميللي رم (2.5 ميللي سيفرت) للقولون، 50 ميللي رم (0.5 ميللي سيفرت) للغدد التناسلية. احسب الجرعة الفعالة التي حصل عليها هذا الفني بالميللي سيفرت والميللي رم.

الحل:

باستخدام العلاقة (7−11) والتعويض عن الجرعة المكافئة H_T للأعضاء والأنسجة بوحدات سيفرت أو أجزائه، وبإيجاد قيم العوامل المرجحة W_T للأنسجة والأعضاء من جدول (7−2) تكون الجرعة الفعالة بالسيفرت أو أجزائه هي:

$$E = \sum_T W_T H_T$$

$$= 0.12 \times 150 + 0.12 \times 5 + 0.05 \times 1 + 0.12 \times 2.5 + 0.20 \times 0.5$$

$$= 0.18 + 0.60 + 0.05 + 0.30 + 0.10$$

$$= 1.23 \quad \text{m Sv}$$

أي أن الجرعة الفعالة للجسم كله هي 1.23 ميللي سيفرت.

ولحساب المطلوب بالميللي رم تستخدم وحدة ميللي رم للتعبير عن الجرعة المكافئة H_T وتكون الجرعة الفعالة هي:

$$\mathbf{E} = 0.12 \times 150 + 0.12 \times 500 + 0.05 \times 100 + 0.12 \times 250 + 0.20 \times 50$$

$$= 18 + 60 + 5 + 30 + 10$$

$$= 123 \text{ mrem}$$

أي أن الجرعة الفعالة للجسم كله هي 123 ميللي رم.

والجرعة الفعالة هي الجرعة التي يجري على أساسها حساب المخاطر العشوائية واحتمالاتها .

وتجدر الإشارة إلى أن هناك كمية أخرى تستخدم للتعبير عن الجرعة الفعالة عندما يكون مصدر التعرض مصدرا داخليا، أي أن التعرض ينتج عن اندخال المادة المشعة إلى داخل جسم الإنسان، وتصبح هذه المادة ملازمة له. ويطلق على هذا المصطلح اسم "**الجرعة الفعالة الملازمة** " **(The committed effective dose)** . ومن الأمثلة على الظروف التي تؤدي إلى تلازم الجرعة الفعالة تلك المواد المشعة التي تتسرب للبيئة من الأنشطة النووية المختلفة أو النويدات المشعة التي انطلقت للبيئة من التفجيرات النووية واستقرت على سطح الأرض وأصبحت مقدرة على الإنسان وملازمة له.

وتقاس الجرعة الفعالة الملازمة بنفس وحدات قياس الجرعة الفعالة، أي بالسيفرت في النظام المعياري العالمي أو بالرم في النظام القديم.

7-6-4 الجرعة الفعالة الجماعية E_C

The collective effective dose

هي عبارة عن مجموع الجرعات الفعالة التي تودع في مجموعة بشرية محددة. وعند تساوي متوسط الجرعة الفعالة التي تودع في جميع أفراد المجموعة تكون الجرعة الفعالة الجماعية E_C هي عبارة عن حاصل ضرب متوسط الجرعة الفعالة للفرد E في عدد الأفراد المتعرضين، أي أن:

$$E_C = E \times n$$

حيث n عدد الأفراد. وتقاس الجرعة الجماعية بوحدة فرد. سيفرت (Man.Sievert).

7-7 معدل الجرعة $\dot{D}$ The dose rate

تعبر وحدات الغراي والسيفرت (أو الراد والرم)، بالترتيب، عن مقدار الجرعة الممتصة والجرعة المكافئة أو الفعالة التي حصل عليها عضو أو شخص ما خلال مدة زمنية معينة t . ولتقدير قيمة الجرعة التي يتعرض إليها الشخص خلال زمن معين فإنه يجب معرفة ما يسمى بمعدل الجرعة. ومعدل الجرعة $D^{\bullet}$ في مكان ما هو قيمة الجرعة التي يحصل عليها العضو أو الإنسان في وحدة الزمن، عند وجوده في هذا المكان، أي أن:

$$D = D^{\bullet} \times t \qquad (7\text{-}13)$$

مثال:

إذا كانت الجرعة الفعالة المسموح بها في الأسبوع هي 0.4 ميللي سيفرت. فاحسب الزمن الذي يسمح خلاله لشخص ما بالوجود داخل مختبر في الأسبوع إذا كان معدل الجرعة الفعالة داخل هذا المختبر هو 100 ميكروسيفرت/ساعة.

الحل:

$$D = D^{\bullet} \times t$$

.: الزمن المسموح به لوجود الشخص داخل المختبر خلال الأسبوع كله هو:

$$t = D / D^{\bullet}$$

$$= 0.4 \times 10^{-3} / 100 \times 10^{-6}$$

$$= 4 \quad \text{hours}$$

7-8 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- عرف كلا من كثافة تدفق الجسيمات وكثافة تدفق الطاقة، وما هي وحدات قياسهما؟

2- عرف التعرض، وما هي وحدات قياسه؟.

3- لماذا لا تعتبر معرفة التعرض كافية لأغراض الوقاية الإشعاعية؟

4- ما هو الغراي؟، وكيف يرتبط بالراد؟

5- ماذا تعني الجرعة المكافئة؟، وما هو التأثير البيولوجي النسبي، والعامل المرجح للإشعاع والعامل المرجح للنسيج ؟

6- عرف كل من الجرعة المكافئة والجرعة الفعالة ومعدل الجرعة والجرعة الفعالة الجماعية.

7- ما هي وحدات قياس الجرعة المكافئة والفعالة؟

8- احسب تدفق النيوترونات الناتج عن مصدر نيوتروني يصدر 3×10^{10} نيوترون/ ثانية، وذلك على مسافات 0.3 م ، 1 م ، 10م.

9- مصدر كوبلت 6 يشع إشعاعات جاما، فإذا علمت أن شدة المصدر تبلغ 6000 كوري، احسب كثافة تدفق إشعاعات جاما على مسافة 30 سم ، 5 أمتار من مركز المصدر.
احسب كثافة تدفق الطاقة على المسافة نفسها.

10- احسب القيم التالية بالوحدات الدولية المعيارية:
50 ميكروراد ، 200 ميللي راد ، 5 راد ،
3 ميكرورم ، 0.7 ميللي رم ، 2 رم

11- في أحد المختبرات النووية وضع فنيو الوقاية المعدلات التالية للتعرض:
نيوترونات بطاقة 1-2 م.إ.ف، . 2 ميللي راد/ساعة
نيوترونات بطيئة بواقع 50 ميكررو راد/ساعة

إشعاعات جاما بواقع 4 ميللي رينتجن/ساعة
احسب الجرعة المكافئة بالسيفرت التي تتعرض لها أنسجة عامل مكث في المختبر سبع ساعات.

12- في أحد المختبرات الملوثة بمادة الراديوم المشع كانت قراءات أجهزة قياس الجرعات كالتالي:
جسيمات بيتا 0.5 ميللي راد/ساعة
إشعاعات جاما 0.16 ميكرورينتجن/دقيقة .
احسب الجرعة المكافئة بالسيفرت لرئتي عامل مكث في هذا المختبر ثلاث ساعات، بفرض أنه لم يحدث له تلوث داخلي ولم يقترب من الأسطح الملوثة.

13- إذا كانت الجرعة القصوى المسموح بها في السنة هي 20 ميللي سيفرت، وكانت قراءة الخلفية الإشعاعية في مختبر ما عبارة عن 50 ميكروراد/ساعة لإشعاعات جاما، 5 ميكروراد/ساعة للنيوترونات البطيئة، فما هي المدة القصوى المسموح بالمكوث خلالها داخل المختبر يوميا (اعتبر أن السنة 250 يوم عمل).

14- إذا علمت أن الجرعة الفعالة السنوية المتوسطة الناتجة عن تعرض كافة البشر لإشعاعات جاما المنبعثة من الأرض هي 0.46 ميللي سيفرت. احسب الجرعة الفعالة الجماعية لسكان الكرة الأرضية الناتجة عن هذا النوع من التعرض الطبيعي إذا علمت أن تعداد سكان العالم 6 آلاف مليون نسمة.

الفصل الثامن

حـــدود الجرعات
Dose limits

- اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية – توصيات اللجنة الدولية للوقايـــة الإشعاعية – حدود التعرض– أسئلة ومسائل للمراجعة.

8–1 الهيئات الدولية الراعية للوقاية من الإشعاع

8–1–1 اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية
International Commission on Radiological Protection (ICRP)

تأسست اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) عـــام 1928م. ومنذ ذلك التاريخ كانت هذه اللجنة الهيئة الدولية المسؤولة عـــن وضـــع الحدود القصوى من الجرعات الإشعاعية التي يسمح بالتعرض لها، وعن إصدار التوصيات الخاصة بهذه الحدود وكذلك التوصيات الخاصة بكيفية تداول ونقل وتخزين المواد والمصادر المشعة وغيره. وتجدر الإشـــارة إلى أن معظم القوانين والتشريعات الخاصة بالتعرض للإشعاعات المؤينة والتي تسنها معظم الدول تنبثق أساسا عن توصيات هذه اللجنة.

وفي أول الأمر كانت التوصيات التي أصدرتها هذه اللجنة تقـــوم على أساس الوقاية من الإشعاعات السينية والإشعاعات الصـــادرة عـــن الراديوم. وكانت الحدود القصوى للجرعات الإشعاعية المسموح بها غير كافية الدقة (انظر البند الأول من جدول 8–1). وكانت أهم التوصيات الأولية لهذه اللجنة بشأن فترات التعرض للعاملين ما يلي:

1– يجب ألا تزيد ساعات العمل في المختبرات أو الأمـــاكن التـــي تحوي الإشعاعات أو المصادر المشعة على 7 ساعات في اليوم.

2- يجب ألا تزيد أيام العمل على خمسة أيام في الأسبوع.

3- يجب ألا تقل الإجازة السنوية عن شهر.

4- يجب قضاء أيام العطلات والإجازات بعيدا عن تلك المختبرات أو الأماكن التي تتضمن إشعاعات مؤينة.

ونتيجة لتطور مصادر الإشعاعات وإنتاج العديد من المعجلات والمفاعلات النووية في العالم قامت هذه اللجنة، في عام 1950م، بإعادة النظر في توصياتها السابقة، لتتمشى هذه التوصيات مع العديد من المشكلات الناجمة عن هذا التطور. وتقوم اللجنة بإعادة النظر في توصياتها وفي قيم الحدود القصوى للتعرض وللجرعات الإشعاعية كلما دعت الحاجة إلى ذلك. وقد تم تخفيض الحد الأقصى للجرعات المصرح بها بصورة واضحة خلال السنوات القليلة الماضية. ويبين جدول (8-1) كيفية تطور الحدود القصوى للتعرض الإشعاعي.

جدول (8-1)
الحدود القصوى لتعرض العاملين المهنيين الصادرة عن
اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية وتواريخ صدورها

مسلسل	معدل الجرعة	تاريخ صدوره
1	0.2 رينتجن في اليوم أو 1 رينتجن في الأسبوع.	1934م
2	150 ميللي سيفرت (أي 15 رم) في السنة، أي ما يعادل 3 ميللي سيفرت (أي0.3 رم) في الأسبوع.	1950م
3	50 ميللي سيفرت (5 رم) في السنة، أي مايعادل 1 ميللي سيفرت في الأسبوع.	1956م
4	يجب أن يكون معدل التعرض عند أقل حد معقول، بحيث لا تتجاوز الجرعة المكافئة 50 ميللي سيفرت (5رم) في السنة.	1977م

5	يجب ألا تتجاوز الجرعة الفعالة السنوية للعاملين 20 ميللي سيفرت (2رم) في السنة، ويجب ألا تتجاوز الجرعة الفعالة السنوية لعموم الجمهور 1 ميللي سيفرت (0.1 رم).	1991م

8-1-2 اللجنة العلمية للأمم المتحدة (UNSCEAR)

بعد أن استشعر العالم مخاطر الإشعاعات المؤينة تبنت الجمعية العامة للأمم المتحدة تأسيس لجنة علمية عام 1955 سميت باسم "اللجنة العلمية للأمم المتحدة حول تأثيرات الإشعاعات الذرية- United Nation Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation " وذلك من عشرين دولة من الدول الأعضاء. وتشترك نخبة من علماء تلك الدول المتخصصين في مجالات الفيزياء الإشعاعية والتأثيرات البيولوجية للإشعاع سنويا لدراسة جميع النواحي العلمية والإحصائية المرتبطة بالإشعاعات المؤينة وانتشار المواد المشعة في البيئة وتأثيراتها البيولوجية. وتهدف اللجنة إلى الحصول على الخلاصة العلمية حول الإشعاعات وتأثيراتها دون أية توجهات سياسية. وتقدم اللجنة تقريرا علميا سنويا للجمعية العامة تضمنه أحدث ما توصلت إليه من خلال البحوث العلمية المتواصلة، كما تصدر كتابا دوريا (كل حوالي 5 سنوات) تضمنه الحصيلة العلمية خلال الفترة. ويعتبر هذا الكتاب الدوري من أهم المراجع العلمية على المستوى الدولي حول الموضوع. وتستند اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية في التوصيات التي تصدرها على خلاصة النتائج العلمية التي تتوصل إليها اللجنة العلمية للأمم المتحدة.

8-2 تطور المعايير الدولية للوقاية الإشعاعية

8-2-1 جرعة التحمل The tolerance dose

في أول الأمر استخدمت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية اصطلاح (جرعة التحمل) للتعبير عن التعرض الإشعاعي الذي يمكن أن يتحمله الإنسان. ولكن هذا الاصطلاح يعطي الإحساس بوجود عتبة معينة لا يحدث قبلها ضرر إشعاعي وإنما يحدث هذا الضرر بعدها. وبناء على النتائج العملية المتوافرة فإنه لا توجد مثل هذه العتبة

للأضرار الإشعاعية العشوائية سواءً الذاتية أو الوراثيـــة. لـــذلك، فقـــد أوصت اللجنة في عام 1958م بالامتناع عن استخدام مصطلح جرعـــة التحمل واستخدام مصطلح آخر بدلا منه عرف بالحد الأقصى المســـموح به.

8-2-2 الحد الأقصى المسموح للجرعة

The maximum permissible dose (MPD)

الحد الأقصى المسموح للجرعة (MPD) هو عبارة عن مقـــدار الجرعة الإشعاعية الفعالة، سواء المتراكمة خلال فترات زمنية طويلة أو الناتجة عن تعرض حاد لفترة قصيرة، التي يكـــون احتمـــال الإصـــابة بأضرار عشوائية (سواء ذاتية أو وراثية) نتيجة لها احتمالا طفيفا، وذلك في ضوء المعلومات المتوفرة في حينه. فعند تعرض مجموعة كبيرة من الأشخاص لجرعة إشعاعية تقع في حدود الحد الأقصى المســـموح بـــه تكون نسبة الإصابة بأي من الأضرار العشوائية نسبة ضئيلة. كذلك، فإن التأثيرات الأخرى لهذه الجرعة كقصر العمر مثلا يكون محدودا للغاية. لذلك، فإنه لا يمكن اكتشاف التأثيرات والأضرار الأخرى الناجمة عـــن الجرعات الإشعاعية التي لا تزيد عن الحد الأقصى المســـموح بـــه إلا بالطرق الإحصائية على مجموعات كبيرة من البشر.

لذلك، أصدرت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية فـــي نشـــرتها السادسة والعشرين الصادرة عام 1977م توصية بعدم صلاحية مصطلح الجرعة القصوى المسموح بها، واستحدثت نظاما آخر ،يعـــرف بنظـــام حدود الجرعات(dose limits) ، يمكن تلخيص مبادئه في التالي:

أ- لن يتم إقرار نظام معين للتعرض الإشعاعي ما لـــم تكـــن وراءه فائدة.

ب- يجب أن يكون التعرض عند أقل حد يعقل إنجازه على أن تؤخذ الظروف الاقتصادية والاجتماعية في الدولة في الحسبان.

ج- يجب ألا تتجاوز الجرعة الفعالة الحدود التي توصي بها اللجنـــة في آخر توصياتها التي تصدرها دوريا.

8-3 توصيات اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية:

8-3-1 النشرة رقم 26 لعام 1977م

في نشرتها السادسة والعشرين تم تقسيم التأثيرات الناجمة عن الإشعاعات المؤينة إلى نوعين رئيسيين هما:

أ- التأثيرات العشوائية (stochastic effects): وهي التأثيرات التي قد تقع على المتعرض أو على ذريته (أبناءه أو أحفاده) وقد لا تقع، والتي يمكن أن تحدث من جرعات صغيرة أو كبيرة، إلا أن احتمال حدوثها يتناسب طرديا (كما ورد) مع مقدار الجرعة، ولا تعتمد حدة المرض عل مقدار الجرعة.

ب- التأثيرات الحتمية (deterministic effects): وهي التأثيرات التي لا تحدث إلا إذا زادت جرعة التعرض على عتبة (حد) معينة وتقع الإصابة بالتأكيد عند تجاوز هذه العتبة، وتزيد حدة الإصابة بزيادة الجرعة.

وطبقا لتوصيات اللجنة الصادرة بالنشرة رقم 26 لسنة 1977 تتجلى أهم أهداف الوقاية الإشعاعية فيما ما يلي:

أ- منع حدوث التأثيرات الحتمية وذلك بتحديد قيمة عتبة الجرعة لكل مرض من هذه الأمراض، وخفض حدود جرعات التعرض لتكون دون هذه العتبة بكثير.

ب- خفض احتمال حدوث التأثيرات العشوائية بخفض معدل التعرض إلى أقل حد معقول حتى تبقى احتمال الإصابة بهذه الأمراض في حدود مقبولة مع أخذ العوامل الاقتصادية والاجتماعية في الحسبان. وهنا تبنت اللجنة مبدأ جديدا عرف باسم مبدأ "ألارا" وهي الأحرف الأولى لخمس كلمات إنجليزية هي " As Low As Reasonably Achievable" وتعني بالعربية أقل ما يعقل إنجازه.

مبدأ ألارا: ALARA Principle

قبل النشرة رقم 26 لعام 1977م كان المبدأ المطبق هو أقل ما يمكن "As low as possible". إلا أن اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية قد رفضت هذا المبدأ وحل محله المبدأ الجديد. فمن المعروف أنه يمكن تبني جوانب وقائية ممتازة، ولكن بتكاليف باهظة. فهل تبرر هذه التكاليف الفوائد والمنافع. فقد يكون من الأجدى إنفاق هذه النفقات في جوانب أخرى تعود بمنفعة أكبر على المجتمع ككل، وليس على العاملين بالإشعاع وحدهم. وهنا برزت فلسفة تبرير إجراءات الوقاية وضرورة الموازنة بين الأضرار المتوقعة وبين المنافع، وبالتالي برز مبدأ التبرير، ومعناه أن تتغلب منافع أي إجراء وقائي على أضراره للمجتمع ككل، مع أخذ العوامل الاقتصادية والاجتماعية في الحسبان. ومن هنا برز مصطلح أقل ما يعقل إنجازه (ALARA) .

8-3-2 النشرة رقم 60 لسنة 1990

في ضوء المستجدات التي توصلت إليها كل من اللجنة العلمية للأمم المتحدة (UNSCEAR)، ولجنة التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة (BEIR)، وعدد من اللجان الوطنية العلمية، تبين أن عامل المخاطر الخاص بالإصابة بالأمراض السرطانية والوراثية أعلى بكثير من المعامل المستخدم سابقا وهو حوالي 0.013 لكل فرد.سيفرت في المتوسط للجنسين. وقد حددت جميع هذه اللجان المختلفة هذا المعامل بما يتراوح بين حوالي 0.045 وحوالي 0.090 وبقيمة متوسطة تبلغ حوالي 0.060 . وهذه يعني أن حجم المخاطر السرطانية، يبلغ خمسة أضعاف ما كان يعتقد قبل ذلك. لذلك، أو صت اللجنة الدولية في نشرتها رقم 60 بحدود أقل سواءً للتعرض المهني أو لتعرض عموم الجمهور.

فبالنسبة للعاملين مهنيا بالإشعاعات خفض الحد السنوي من 50 إلى 20 ميللي سيفرت (2 رم)، أي بواقع مرتين ونصف عما كان قبله. وتم تحديد حدود للجرعات المكافئة لبعض أعضاء الجسم البشري، كما

تم وضع حدود منخفضة للنساء الحوامل من العاملات وللمتدربين والطلبة. وبالنسبة لعموم البشر خفض الحد السنوي من 5 إلى 1 ملي سيفرت أي بواقع خمسة أضعاف.

8-3-3 حدود الجرعات الفعالة والمكافئة للعاملين المهنيين
The occupational effective and equivalent dose limits

لخفض التأثيرات العشوائية بين العاملين في المجالات الإشعاعية أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية في نشرتها رقم 26 لعام 1977م بأن لا يزيد حد الجرعة الفعالة للمتعرضين للإشعاع مهنيا على 50 ميللي سيفرت (5رم) في السنة من جميع مسالك التعرض الداخلية والخارجية.

كذلك، أوصت اللجنة بحدود معينة للجرعات المكافئة لبعض أجزاء الجسم البشري، بحيث يتحقق الهدفان السابقان للوقاية من الإشعاع. والحدود المطبقة على العاملين المهنيين بالإشعاع وفقا للنشرة 60 لعام 1990 هي:

أ- حد التعرض السنوي (الجرعة الفعالة) للعاملين المهنيين هو 20 ميللي سيفرت. ويجوز رفع هذا الحد في سنة من السنين حتى 50 ميللي سيفرت، بشرط أن لا تتجاوز الجرعة الفعالة التراكمية خلال أي خمس سنوات متعاقبة 100 ميللي سيفرت.

ب- حد التعرض للحامل طوال فترة الحمل 1 ميللي سيفرت إذا كان التعرض داخليا، 2 ميللي سيفرت إذا كان التعرض خارجيا.

ج- حد التعرض السنوي للمتدربين والطلبة الذين تتراوح أعمارهم بين 16، 18 سنة هو 6 ملي سيفرت بشرط أن يكون هذا التدريب جزءاً من مهامهم أو دراستهم.

د- يحظر تعرض من تقل أعمارهم عن 16 سنة.

هـ الحد السنوي للجرعة المكافئة لعدسة العين للعاملين المهنيين هو 150 ميللي سيفرت وللأطراف (أي اليدين والقدمين) هو 500 ميللي سيفرت

هـ الحد السنوي للجرعة المكافئة لعدسة العين للمتدربين هو 50 ميللي سيفرت وللأطراف (أي اليدين والقدمين) هو 150 ميللي سيفرت

8-3-4 تصنيف أماكن العمل

تصنف اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية أماكن العمل طبقا للظروف الإشعاعية إلى نوعين:

أماكن الفئة أ Working condition A

وهي تلك الأماكن التي يمكن أن يتجاوز فيها التعرض (10/3) حدود الجرعة الفعالة المطبقة. وحيث أن حد التعرض المهني المطبق حاليا هو 20 ميللي سيفرت، فإن الأماكن التي يمكن أن يتجاوز معدل التعرض السنوي فيها 6 ميللي سيفرت يجب أن تنتمي لمناطق الفئة أ. ويجب أن يخضع العاملون في مثل هذه الأماكن لبرنامج متكامل للوقاية الإشعاعية، سواءً بالنسبة للتعرض الخارجي أو التلوث الداخلي. كذلك، يجب أن يخضع العاملون في هذه الأماكن للفحوص الطبية الدورية، كما يجب إجراء فحوص طبية لهم قبل التكليف بالعمل في هذه الأماكن، وقبل إجراء أي عمليات جراحية لأي منهم.

أماكن الفئة ب Working condition B

هي تلك الأماكن التي لا يمكن أن يتجاوز فيها التعرض الإشعاعي (10/3) حدود الجرعة الفعالة أو المكافئة. وعموما، فإنه لا يخضع العاملون في تلك الأماكن لفحوص ما قبل العمليات. ولكن يجب

إخضاعهم للرقابة الإشعاعية للتأكد من سلامة هذه الرقابة ومن أن التعرض فعلا لا يتجاوز الحدود المبينة.

8-3-5 حدود الجرعة لعموم الجمهور

dose limits for member of public

بالنسبة لعموم الجمهور أوصت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية في نشرتها رقم 60 الصادرة عام 1991م بالحدود التالية للجرعات:

لخفض التأثيرات العشوائية بين عموم الجمهور يجب ألا تتجاوز الجرعات الحدود التالية:

أ- حد الجرعة الفعالة 1 ميللي سيفرت في السنة عند تعرض الجسم بأكمله لمجال إشعاعي منتظم. ويجوز زيادة هذا الحد في إحدى السنوات إلى 2 ميللي سيفرت بشرط أن لا تتجاوز الجرعة الفعالة المتراكمة خلال أي خمس سنوات متعاقبة 5 ميللي سيفرت.

ب- الحد السنوي للجرعة المكافئة لعدسة العين لعموم البشر هو 15 ميللي سيفرت وللأيدي والأقدام هو 50 سيفرت.

وبالنسبة لباقي الأعضاء يمكن استخدام العلاقة (7-11) مع استخدام المعاملات الوزنية المبينة في جدول (7-2) لإيجاد حد الجرعة المكافئة للعضو إذا كانت هذه الجرعة لا تتجاوز التأثير الحتمي لهذا العضو.

8-4 التعرض في ظروف خاصة

8-4-1 التعرض المخطط في ظروف خاصة

The planned special exposure

في بعض الحالات الخاصة والنادرة تتطلب ظروف التشغيل والعمل ضرورة تواجد عدد قليل من العاملين في ظروف إشعاعية معينة، قد يتعرضون خلالها لجرعة إشعاعية تزيد على الحدود التي أوصت بها اللجنة. في مثل هذه الحالات التي لا تتوفر معها وسيلة بديلة

لتعرض هؤلاء العاملين فإنه يسمح لأقل عـــدد ممكـــن مـــن العـــاملين بالتعرض لجرعة لا تتعدى 50 ميللي سيفرت للجسم ككل فـــي المـــرة الواحدة، ولا تزيد على خمسة أضعاف الجرعة السنوية (أي 100 ميللي سيفرت) طوال العمر كله. وفي مثل هذه الحالات لا يسمح بأي حال من الأحوال لأي عامل يكون قد سبق له التعرض لخمسة أضعاف الجرعـــة السنوية بأن يشترك في هذا التعرض. كذلك، تمنع الســـيدات فـــي ســـن الإنجاب من الاشتراك في هذا التعرض.

8-4-2 التعرض في ظروف الطوارئ الإشعاعية
Exposure in emergencies and accidents

في حالات الطوارئ والحوادث الإشعاعية لا توجد حدود معينة للجرعات الإشعاعية ويجوز السماح بالتعرض لجرعات أعلـــى. وقد أقرت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية أنه لا يمكن إصـــدار توصيات خاصة بحدود الجرعات أو المستوى الإشـــعاعي فـــي حالات الطوارئ والحوادث الإشعاعية، نظرا لاختلاف طبيعتها.

ولخفض التعرضات الناتجة عن الحادث المعين (سواء بالنســـبة للعاملين أو لعامة الجمهور) فإنه يجب الالتزام بوجود خطـــة طـــوارئ تفصيلية وتدريب العاملين علي تنفيذ هذه الخطط وعلى مواجهة عدد من الطوارئ الوهمية.

وعند وضع خطة الطارئ يجب الالتزام بالبنود الرئيسة التالية:

أ- محاولة خفض التعرض إلى أقل قيمة ممكنة ومحاولـــة تلافـــي الجرعات الأعلى من حدود الجرعات الفعالة أو المكافئة.
ب- استعادة السيطرة على الموقف بأسرع ما يمكن.
ج- الحصول على المعلومات الخاصة بأســـباب الحـــادث وتطـــوره والتصرف تبعا لذلك.

وفي حالات الطوارئ يمكن أن يتعرض بعض المتطوعين إلـــى جرعات عالية بغرض إنقاذ الأرواح البشرية أو منع حـــدوث أضـــرار

جسيمة أو وقف تطور الحادث. ويصعب هنا وضع حدود معينة للجرعات حيث تختلف الظروف من حادث إلى آخر. ولكنه من المحتمل أن يحصل بعض المتطوعين على جرعات تفوق حدود الجرعات الفعالة المخططة، وخصوصا إذا كان الأمر يتعلق بإنقاذ حياة بعض البشر. وعند إجراء عمليات الإنقاذ قد يكون من الصعب القيام بالأعمال الخاصة بتحديد المستويات أو معدل الجرعات الإشعاعية. ولكنه يجب تنفيذ هذه الأعمال على وجه السرعة من قبل شخص أو أشخاص مؤهلين وذلك بغرض اتخاذ القرار على ضوء المعلومات التي ستوفرها المجموعة المؤهلة .

ومن المحتمل أن تصل الجرعة للشخص القائم بالإنقاذ إلى 1 غراي. ويسمح بالحصول على مثل هذه الجرعة إذا كان الأمر يتطلب إنقاذ حياة البشر. أما إذا تطلب القيام بالعملية الحصول على جرعة أكبر من 1 غراي فإنه في هذه الحالة يجب الحكم بعناية والموازنة بين القيام بالمخاطرة ونتائج العملية. ومن أهم المبادئ الأساسية التي يجب الالتزام بها في هذه الحالات مايلي:

أ- إن يكون الهدف من وراء هذا التعرض هو إنقاذ الأرواح.
ب- أن يكون التعرض تطوعيا ولا يفرض على أحد مع إدراك المتطوع إدراكا كاملا بالمخاطر التي قد تقع عليه بما فيها الموت.
ج- أن يكون المتطوع ملما بالعمل الذي سيقوم به ومدربا على تنفيذه.

وعموما يتوقف اتخاذ قرار التعرض التطوعي في الحالات الطارئة على:

أ- مدى دقة المعلومات الخاصة بمعدل الجرعة في منطقة الحادث.
ب- ظروف المصابين ومدى احتمال بقائهم على قيد الحياة.

فعلى سبيل المثال إذا كان معدل الجرعة الذي تم تقـديره أقـل مرتين من المعدل الحقيقي للجرعة يمكن أن يحصـل الشـخص القـائم بالإنقاذ على جرعة كافية لإصابته إصـابة خطيـرة بأحـد الأمـراض الفورية.

8-5 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- ما معنى الحد الأقصى المسموح للجرعة؟، وكيف تطـور هـذا المفهوم حاليا؟

2- ما هي الخطوط العريضة لنظام حدود الجرعات التي أوصت بها اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية عام 1977م.

3- ما هي التأثيرات الحتمية والعشوائية؟، اذكر بعـض الأمـراض التي تنتمي لكل منها.

4- اشرح مفهوم التبرير ومعنى مصطلح أقل ما يعقل إنجازه.

5- ما هي حدود الجرعات السنوية للتـأثيرات العشـوائية بالنسـبة للعاملين المهنيين؟، وما هي حدود الجرعات المكافئة؟

6- ما هي حدود الجرعات السنوية الفعالة للتـأثيرات العشـوائية لعامة الجمهور؟، وما هي حدود الجرعات المكافئة لهم.

7- تعرض أحد الفنيين لمجـال إشـعاعي غيـر منـتظم، وكانـت الجرعات الفعالة والمكافئة التي حصل عليها كالتالي:
الجرعة الفعالة لكامل لجسم 10 ميللي سيفرت.
الجرعة المكافئة للرئة 40 ميللي سيفرت.
فما هي الجرعة الفعالة التي يمكن أن يتعرض لها نخاعه الشوكي بحيث لا تتعدى الجرعة الفعالة الكلية لهذا الشخص حد الجرعـة السنوية.

8- ما هو الفرق بين أماكن الفئة أ وأماكن الفئة ب؟.

9- ما هي حدود التعرض في الظروف الخاصة؟ وما هي تلك الظروف؟.

10- ما هي حدود التعرض في حالات الطوارئ والحوادث الإشعاعية.

11- ما هي الخطوط العريضة لخطة الطوارئ الإشعاعية.

الفصل التاسع

التطبيقات الطبية للإشعاعات المؤينة
Medical Application of radiation

مقدمة – استخدام الإشعاعات للتشخيص – التشخيص بالطب النووي – التصوير بالنويدات المشعة– الدراسات التشخيصية بالنويدات المشعة – حساب الجرعة عن المادة المحقونة– استخدام الإشعاعات للعلاج

9-1 مقدمة

حدث في العقود الأخيرة من القرن العشرين تطور هائل في تطبيقات الإشعاعات المؤنية والمواد المشعة في عدد من المجالات الصناعية والزراعية والصيدلانية والطبية وغيرها. وسوف يستعرض هذا الفصل بعض أهم تطبيقات الإشعاعات والمواد المشعة في الطب في عدة مجالات متنوعة أهمها ما يلي:

- استخدام الإشعاعات المؤينة أو النظائر المشعة في التشخيص
- استخدام الإشعاعات المؤينة أو النظائر المشعة في العلاج Radiotherapy .
- استخدام الإشعاعات في تعقيم الدم والصيدلانيات والمواد الصيدلانية والمعدات الطبية Sterilization of blood, medical and pharmaceutical product .
- استخدام الإشعاعات لإنتاج اللقاحات المختلفة.
- استخدام النظائر كمصدر للطاقة الكهربائية في الأجهزة التي تغرس في جسم الإنسان كمنظمات ضربات القلب pace maker .

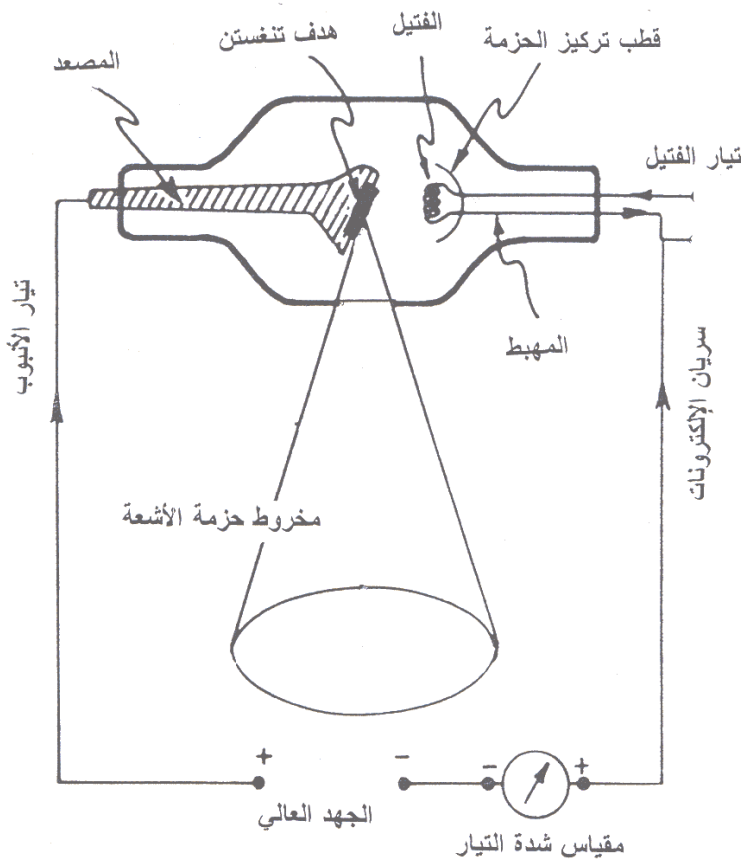
9-2 استخدام الإشعاعات المؤينة في التشخيص

انتشر في القرن العشرين استخدام الإشعاعات المؤنية المختلفة في مجال تشخيص كافة الظواهر المرضية في الجسم البشري وفي التطبيقات البيولوجية والطبية المختلفة. فمنذ اكتشاف الأشعة السينية في نهاية القرن التاسع عشر بدأ استخدامها في تصوير كافة أعضاء الجسم البشري وأنسجته، وبالتالي تشخيص الغالبية العظمى من العيوب والتشوهات البدنية في الكائنات الحية. فالأشعة المذكورة قادرة على تكوين صور جلية للتفاصيل الداخلية لأي عضو أو نسيج بشري أو غير بشري، توضح كافة تفاصيله الداخلية مما يوفر للطبيب إمكانيات هائلة لتشخيص المرض أو العيب أو التشوه في العضو أو النسيج المعين، ومع تطور علوم الحاسب الآلي وسبل الكشف عن الإشعاعات المؤينة تطور علم التصوير الإشعاعي من التصوير على أفلام التصوير العادية إلى التصوير الفلوروسكوبي على الشاشات ثم إلى التصوير المقطعي Tomography باستخدام الحاسبات الآلية. وتتناول الفقرات التالية أهم خصائص استخدامات الأشعة السينية في التشخيص. وتفادياً للتكرار سوف يعرج الحديث أحياناً عن أهم خصائص هذه الأشعة عند استخدامها للأغراض العلاجية.

9-2-1 إنتاج وخصائص الأشعة السينية التشخيصية والعلاجية

ورد في الفصل الثاني أن الأشعة السينية تتولد عند رجم إلكترونات سريعة لهدف مصنوع من فلز ذي عدد ذري كبير. وفي جميع التطبيقات الطبية والصناعية تستخدم لتوليد الأشعة السينية أنابيب زجاجية مفرغة من الهواء يطلق عليها اسم أنبوب الأشعة السينية. وتحتوي الأنبوب (شكل 9-1) عادة على مصدر للإلكترونات التي تنبعث من فتيل من مادة التنغستن الذي يسخن إلى درجات حرارة عالية بفعل تيار كهربائي. وتوجه الإلكترونات المنبعثة من الفتيل نحو المصعد (الأنود) بواسطة فرق جهد كهربائي مستمر يتراوح بين عدة عشرات الآلاف وعدة مئات الآلاف من الفولط. وبذلك، تكتسب جميع

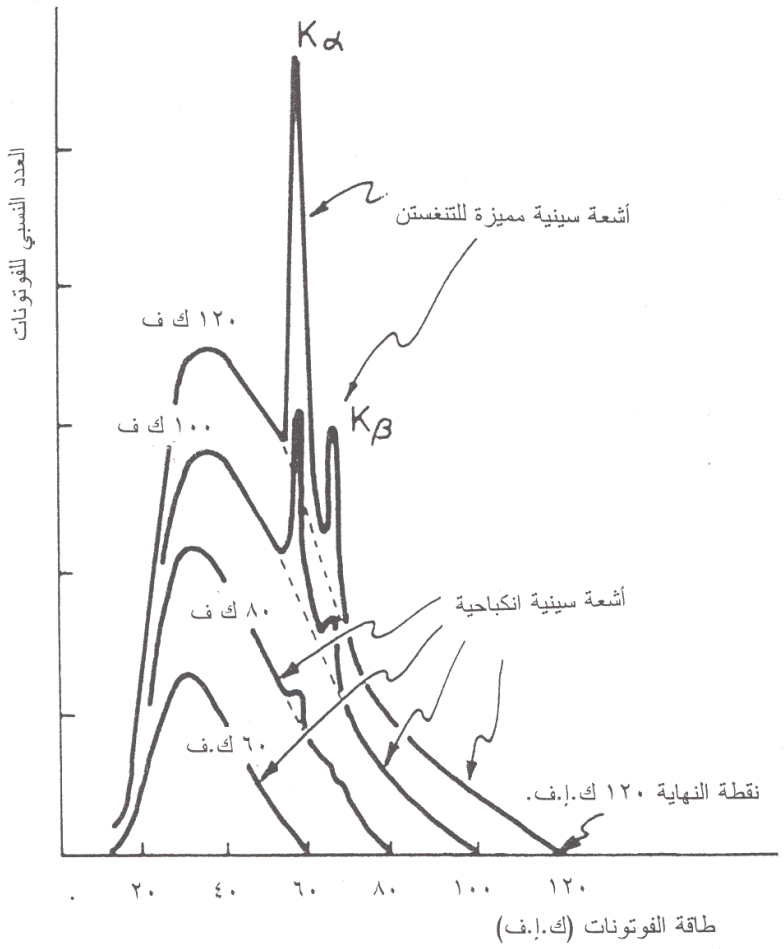
الإلكترونات عند انتقالها من المهبط للمصعد قيمة واحدة للطاقة تساوي تماماً حاصل ضرب شحنة الإلكترون الواحدة في فرق الجهد بين المهبط والمصعد وذلك بوحدة الإلكترون فولط.



شكل (٩-١): مخطط توضيحي لأنبوب الأشعة السينية

وتنطلق الأشعة السينية الانكباحية (والمعروفة كذلك بالأشعة السينية البيضاء) نتيجة فرملة الإلكترونات المعجلة على مادة الهدف،

كما تنطلق الأشعة السينية المميزة التي تمثل خطـــوط طيـــف الأشـــعة السينية لمادة المصعد (وهي التنغستن غالباً) نتيجة إثارة ذرات المصعد ثم انتقال بعض إلكترونات الذرة من مدار أبعد إلى مدار أقرب للنـــواة. ويبين شكل (9–2) التوزيع الطيفى لفوتونات الأشعة السينية المنبعثة من

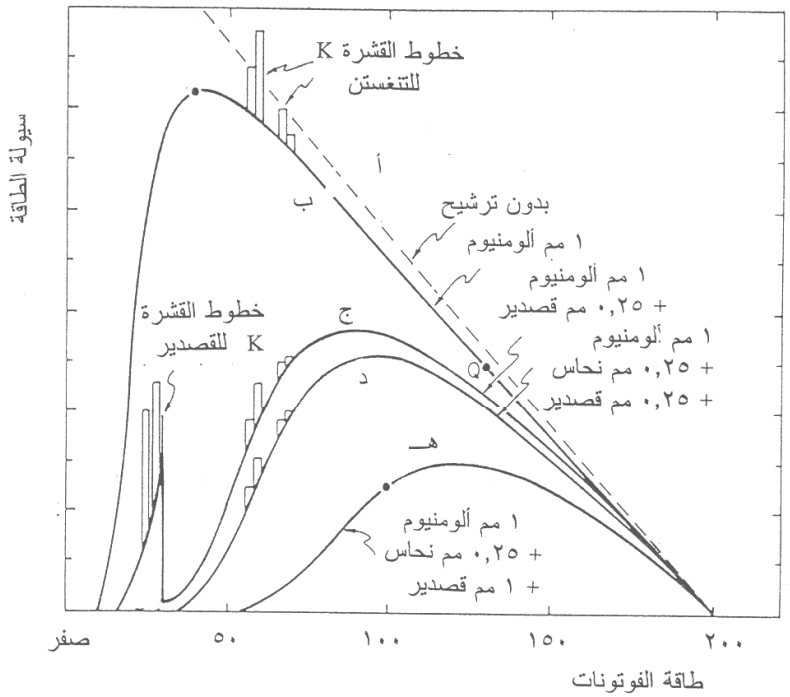


شكل (٩–٢): أطياف الأشعة السينية لجهود تشغيل مختلفة

أنبوب أشعة سينية تستخدم للتشخيص عند فروق جهد بين المهبط والمصعد مقدارها 60، 80، 100، 120 كيلوفولط قمة. وتبين هذه المنحنيات العدد النسبي للفوتونات كدالة من طاقة هذه الفوتونات لقيم مختلفة لجهد تعجيل الإلكترونات. ويظهر على هذا الطيف بوضوح كل من المركبة الانكباحية والمميزة للأشعة السينية حيث تظهر الأشعة المميزة للتنغستن في صورة قمتين حادتين K_α , K_β من حيث الطاقة فوق الطيف المتواصل للأشعة الانكباحية.

9-2-2 ترشيح حزمة الأشعة السينية

عند انطلاق الأشعة السينية نتيجة رجم هدف سميك من التنغستن بحزمة إلكترونات أحادية الطاقة ولتكن 200 كيلو إلكترون فولط يكون توزع طاقة الفوتونات كالمبين في شكل (9-2). وعند حساب سيولة طاقة الفوتونات لعنصر الطاقة كدالة من طاقة هذه الفوتونات يتخذ توزع السيولة الصورة المبينة بالخط المستقيم المتقطع على شكل (9-3). ويتبين من هذا التوزيع أن عدد الفوتونات لعنصر الطاقة كدالة من طاقة هذه الفوتونات منخفضة الطاقة هي السائدة في حين أن عدد الفوتونات ذات الطاقة المرتفعة نسبياً وبالتالي سيولة الطاقة لهذه الفوتونات تكون محدودة للغاية. ومثل هذه الحزمة من الأشعة السينية غير ملائمة سواء بالنسبة لاستخدام هذه الأشعة للفحوص التشخيصية أو لعلاج الأورام. ويعود السبب في ذلك إلى أن الفوتونات منخفضة الطاقة سوف تمتص في الطبقة السطحية من الجسم (أي في الجلد) ولن تصل إلى الطبقات العميقة من الأنسجة، وبالتالي تودع طاقة هذه الفوتونات في الطبقة السطحية دون الوصول للعمق المطلوب. وبالتالي، تعتبر الفوتونات منخفضة الطاقة (وهي الغالبة من حيث العدد) غير مفيدة لأداء المهمة بل وضارة نظراً لإيداعها كل طاقتها قرب الطبقة السطحية من الجسم.



شكل (٩-٣): تأثير الترشيح على طيف الأشعة السينية

وعموماً، يمكن التخلص بسهولة من الفوتونات منخفضة الطاقة التي تعتبر فوتونات غير مرغوب فيها سواء بالنسبة للتصوير التشخيصي أو لعلاج الأورام العميقة وذلك باستخدام مرشحات ملائمة لترشيح حزمة الأشعة السينية. وتبين المنحنيات ب، ج، ء، هـ على شكل (9-3) كيفية تغير توزع سيولة الطاقة عند استخدام مرشحات مختلفة النوع والسمك. فالمنحنى ب يبين كيفية توزع سيولة طاقة الفوتونات كدالة من طاقتها عند استخدام مرشح عبارة عن شريحة يبلغ سمكها 1 مم من الألومنيوم. أما المنحنى ج فينتج عند ترشيح الحزمة الأولية بواسطة شريحتين متتاليتين الأولى من الألومنيوم بسمك 1مم والثانية من القصدير بسمك 0.25 مم. ونتيجة لهذا المرشح المركب

تنخفض سيولة طاقة الفوتونات في منطقة الطاقات المنخفضة (من حوالي 40 إلى 40 كيلو إلكترون فولط) إلى ما يقرب من الصفر، إلا أنه تظهر شريحة من الفوتونات منخفضة الطاقة عند أقل من 29.2 ك.إ.ف. وتعود هذه الزيادة إلى تفاعل فوتونات الأشعة السينية مع الإلكترونات الداخلية لذرات القصدير وحدوث الظاهرة الكهروضوئية عليه، وبالتالي ظهور الأشعة السينية المميزة للقصدير في صورة نتوءات عالية في المدى بين حوالي 25، 29 ك.إ. ف.

ويمكن التخلص من هذه النتوءات على المنحنى ج ومن مركبة الأشعة السينية منخفضة الطاقة باستخدام طبقة من النحاس Cu يبلغ سمكها 0.25 مم توضع بين الألومنيوم والقصدير، حيث يتخذ بعدها منحنى السيولة الصورة المثبتة بالمنحنى د من نفس الشكل . وبزيادة سماكة طبقة القصدير من 0.25 مم حتى 1 مم مع وجود مرشحا الألومنيوم والنحاس بالسماكتين المذكورتين تختفي الفوتونات منخفضة الطاقة تماماً من الحزمة ويتخذ منحنى السيولة الصورة المبنية بالمنحنى هـ على نفس الشكل.

ويطلق على المرشح المركب من هذه الطبقات الثلاثة المتتابعة اسم مرشحات ثورايوس Thoraeus filters . ويجب التنويه بضرورة المحافظة على ترتيب الطبقات بحيث يكون الفلز ذو العدد الذري الأكبر أقرب إلى الأنبوب والفلز ذو العدد الذري الأصغر أبعد من الأنبوب (أي في اتجاه المريض) .

وهكذا، تستخدم مرشحات مكونة من فلزات محددة بسماكات محددة للحصول على الحزمة ذات التوزع الطاقي المطلوب للغرض المحدد سواء التشخيصي أو العلاجي.

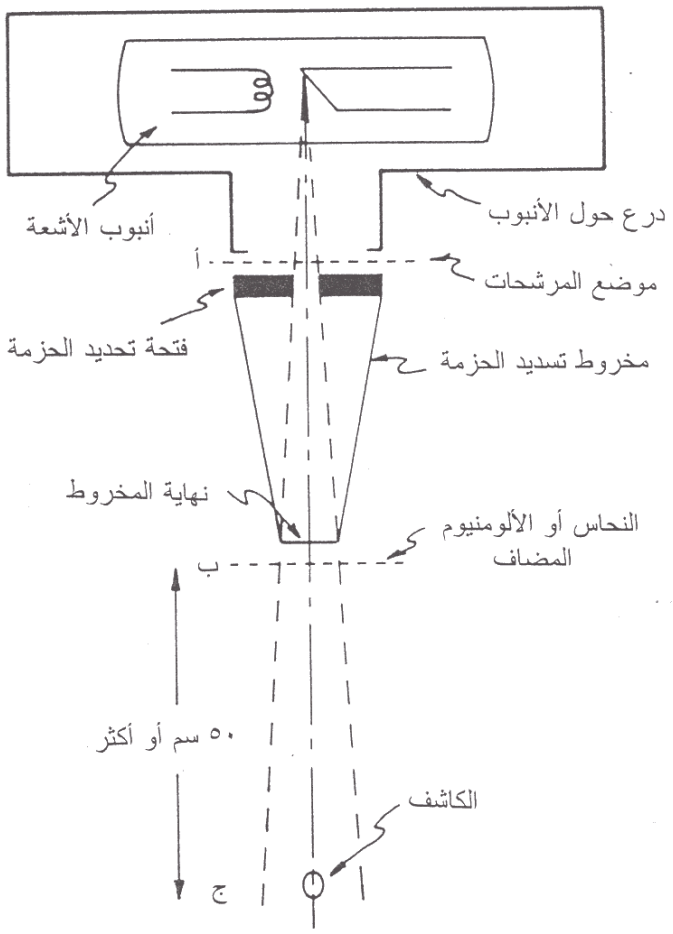
9 – 2 – 3 نوعية الأشعة السينية والسمك النصفي

The quality of x-rays

نظراً للحاجة إلى معرفة العمق الذي تخترقه الأشعة السينية في النسيج البشري فإنه يتم التعبير في بعض الأحيان عن نوعية هذه الأشعة بدلالة قيمة السمك النصفي (Half Value Layer HVL). والسمك النصفي لمادة معينة هو ذلك السمك من هذه المادة اللازم لخفض جرعة الحزمة إلى نصف قيمتها الأصلية بناءً على قياس التعرض بالرنتجن بواسطة جهاز خاص معاير لمثل هذه القياسات. وعموماً، يقاس السمك النصفي بهذا المفهوم بالنسبة للجهود الواقعة بين 120، 400 كيلو فولط بعدد المليمترات من سمك شريحة من النحاس. أما عند الجهود الأقل من 120 كيلوفولط فيقاس السمك النصفي عادة بعدد مليمترات الألومنيوم.

9-2-4 قياس السمك النصفي للأشعة السينية

يتم قياس السمك النصفي للحزمة المعينة من الأشعة السينية وذلك بقياس كيفية تغير معدل التعرض بالرنتجن عند وضع سماكات توهين مختلفة في مسار الحزمة. ولهذا الغرض يتم اختيار الوضع الهندسي المبين في شكل (9-4) بالدقة الواجبة، حيث يجب أن يوضع الحجم الحساس لمقياس معدل التعرض عند النقطة ج التي تقع على محور الحزمة والتي تبعد ما لا يقل عن 50 سم من الحافة الخارجية لمخروط تشكيل الحزمة حتى يمكن تفادي أكبر نسبة ممكنة من الأشعة المتشتتة. فضلاً عن ذلك، يجب أن توجه حزمة الأشعة السينية بالنسبة للغرفة بحيث يكون الحجم الحساس لمقياس معدل التعرض بعيداً عن أي جسم قد يؤدي إلى حدوث تشتت للحزمة عليه بما في ذلك جدران الغرفة وأرضيتها وسقفها.



شكل (٩-٤): أسلوب قياس السمك النصفي

كذلك، يجب خفض مساحة مقطع الحزمة المنطلقة من الجهاز بحيث تكون أبعاد هذا المقطع حوالي 5 سم × 5 سم عند موقع المقياس في النقطة ج. ويجب توجيه عناية خاصة للتأكد من وجود المقياس في مركز هذا المقطع. ويسهل تحقيق ذلك بالنسبة لأجهزة الأشعة المزودة بمبين ضوئي لموضع الحزمة وعندما تكون فتحة تسديد الحزمة من

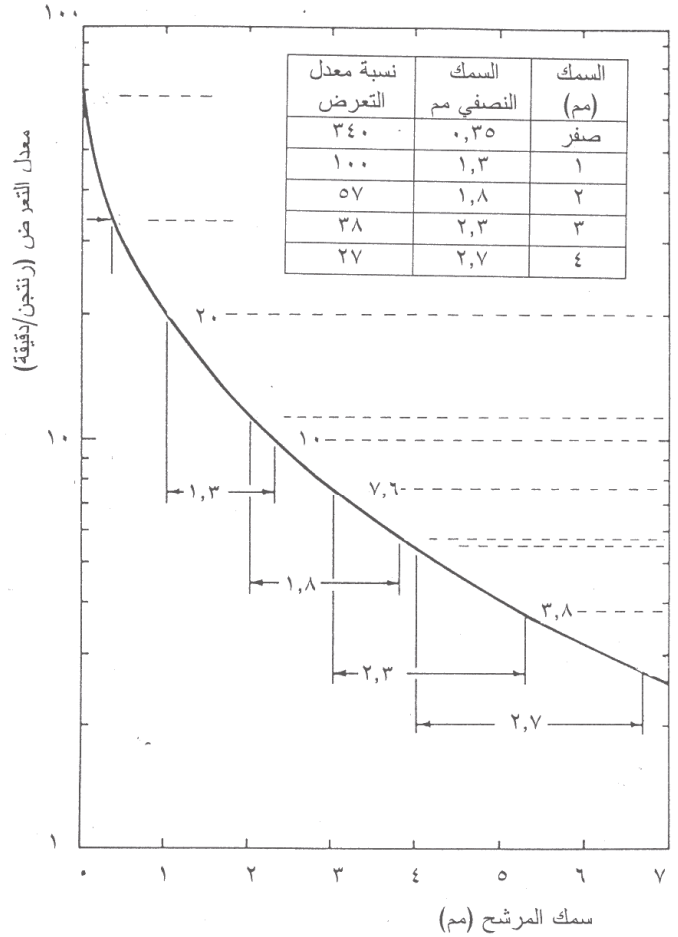
النوع القابل للضبط بصفة مستمرة. في هذه الحالة فإن أبسط طريقة لاختبار تسديد الحزمة هو تركيب شاشة فلورية خلف مقياس التعرض مباشرة وتشغيل جهاز الأشعة للحظة قصيرة ومراقبة ظل المقياس، بحيث يكون في مركز المجال الإشعاعي للحزمة.

ويجب الإشارة إلى ضرورة أن يكون حجم المجال الإشعاعي للحزمة أكبر من الجزء الحساس للمقياس حتى لا يكون هناك جزء من هذا المقياس خارج المجال الإشعاعي (الحزمة الإشعاعية).

ويجب الإشارة إلى ضرورة التفريق بين موضع المرشحات الأصلية للحزمة الذي يجب أن يكون عند النقطة أ على الشكل (9–4) وموضع المادة المطلوب قياس سمكها النصفي الذي يجب أن يكون عند النقطة ب على نفس الشكل. ويجب أن تكون أبعاد شرائح التوهين المصنوعة من النحاس أو الألومنيوم في حدود 5 سم × 5 سم وأن يكون سمكها ثابتا وأن تكون خالية تماماً من أي شوائب.

ويجب تعيين معدل التعرض (بوحدة رنتجن/دقيقة) لمجموعة من شرائح التوهين الموضوعة عند النقطة ب مع ضرورة بقاء كل من جهد الأنبوب وتيارها ثابتين بقدر المستطاع. وهنا تجدر الملاحظة إلى أنه قد ورد في الفصل الثالث أن العلاقة بين كثافة الإشعاعات I وسمك شريحة التوهين هي علاقة أسية. بمعنى أنه عند رسم العلاقة بين لوغاريتم I وبين سماكة الشريحة يجب الحصول على منحنى يتخذ صورة المستقيم. إلا أن الواقع التجريبي يبين عدم دقة هذه الخاصية حيث يختلف المنحنى المتحصل عملياً اختلافاً جوهرياً عن الخط المستقيم ويتخذ الصورة المبنية في شكل (9 – 5). ويعود السبب في ذلك إلى عدة عوامل أهمها أن حزمة الأشعة السينية تتميز بطيف مستمر للطاقة وليس بقيمة طاقة وحيدة. وعند ترشيح الحزمة بمجموعة مرشحات تتضمن عناصر متوسطة وثقيلة تمتص المركبات منخفضة الطاقة من الأشعة السينية

وتصبح شريحة الطاقات محدود الامتداد وتسود فيها قيم الطاقات العالية. عندئذ يزداد السمك النصفي للحزمة ويقترب منحنى الجرعة كدالة مـــن السمك من العلاقة الخطية بين معدل الجرعة والسمك.



السمك (مم)	السمك النصفي مم	نسبة معدل التعرض
صفر	٠,٣٥	٣٤٠
١	١,٣	١٠٠
٢	١,٨	٥٧
٣	٢,٣	٣٨
٤	٢,٧	٢٧

شكل (٩-٥): منحنى التوهين العملي في النحاس لأشعة جهدها الأقصى ٢٠٠ ك ف

9-2-5 السمك النصفي والمرشحات للأجهزة العلاجية

في الماضي استخدمت أجهزة أشعة سينية بجهود تتراوح قيمتها القصوى بين حوالي 200، 400 كيلوفولط للأغراض العلاجية. وبالنسبة لهذه الأجهزة فإن تعيين السمك النصفي احتل درجة عالية من الأهمية بهدف تعيين توزع الجرعات كدالة من العمق. أما في الوقت الحالي فإن تعيين السمك النصفي لهذا المدى من الجهود بات أقل أهمية. أما في المدى بين 100، 150 كيلوفولط فما زال تعيين السمك النصفي أمراً ضرورياً. فمثل هذه الحزم من الأشعة السينية يلزم ترشيحها بمرشحات من الألومنيوم، ويتم تشغيلها عادة بمرشحات يتراوح سمكها بين 2 ، 3 مم. وتستخدم مثل هذه الحزم بعد الترشيح لعلاج الأورام السطحية (الظاهرية) .

أما بالنسبة لمصادر السيزيوم 137 أو الكوبلت 60 المستخدمة في العلاج فإن حزمها لا تحتاج لأي نوع من المرشحات نظراً لأن إشعاعات جاما المنطلقة من هذين المصدرين تتميز بقيمة وحيدة أو قيم محددة للطاقة دون غيرها. فكما ورد في الأبواب السابقة فإن السيزيوم 137 يصدر أشعة جاما بطاقة وحيدة هي 0.662 ميغاإلكترون فولط، ويصدر الكوبلت 60 أشعة جاما بطاقتين هما 1.173، 1.332 ميغا إلكترون فولط، ويمكن اعتبارهما كطاقة متوسطة وحيدة مقدارها 1.250 ميغا إلكترون فولط .

أما المعجلات الخطية (Lin ac) التي تتراوح طاقة تعجيل الإلكترونات فيها بين 4، 20 م.إ.ف، وكذلك معجلات البيتاترون التي تتراوح طاقة تعجيل الإلكترونات فيها بين 20، 30 م.إ.ف فتصدر بدورها حزماً متصلة الطاقة من الأشعة السينية تتراوح طاقاتها من 1 م.إ.ف وحتى الطاقة القصوى للإلكترونات. وبالنسبة لهذا المدى العريض من طاقات الأشعة السينية (من 1 حتى 20 م.إ.ف للمعجلات الخطية أو من 1 حتى 30 م.إ.ف لمعجلات البيتاترون) فإنه لا يوجد

مرشح مناسب للحزمة. فمن المعروف أن مقدار معامل التوهين بالنسبة للرصاص مثلاً كدالة من الطاقة يصل إلى أدنى قيمة له عند حـــوالي 3 م.إ.ف، ويزيد مقدار هذا المعامل بزيادة الطاقة أو بانخفاضها (راجـــع الفصل الثالث).

وبالتالي، فإن استخدام أي مرشح من مادة عالية العـــدد الـــذري كالرصاص سوف يوهن كثيـــراً الإشـــعاعات ذات الطاقـــات العاليـــة والمنخفضة ويمرر الإشعاعات التي تقع طاقاتها حـــول 3 م.إ.ف. أمـــا بالنسبة للمواد متوسطة العدد الذري كالنحاس مثلاً فإن معامل التـــوهين يكاد يكون ثابتاً عند جميع الطاقات، وبالتالي فإن استخدام المرشح يوهن الإشعاعات عند جميع الطاقات بنفس النسبة، مما يجعل مثل هذا المرشح عديم الفائدة بل ضاراً. كذلك، لا تستخدم، في كثير من الأحيان، مع هذه المعجلات مرشحات من مواد خفيفة كالألومنيوم نظرا لأنها توهن قليلا الأشعة ذات الطاقات المنخفضة دون تأثير يـــذكر علـــى الأشـــعة ذات الطاقات العالية، فضلاً عن أنه يلزم استخدام سمك كبير جداً مـــن هـــذه المادة لتحقيق التوهين المطلوب.

9-2-6 السمك النصفي والمرشحات للأجهزة التشخيصية

إن عدم استخدام المرشحات الملائمة في أجهزة الأشعة الســـينية التشخيصية قد يؤدي إلى زيادة المخاطر على المريض زيـــادة كبيـــرة. فاستخدام المرشحات الملائمة لحزمة الأشعة السينية يخفض كثيراً حجم المخاطر التي يتعرض لها المريض في نفس الوقت الذي يؤدي ذلك إلى تحسين نوعية الصورة أو الفحـــص التشخيصـــي. فبالنســـبة للأشـــعة التشخيصية فإنه يجب استخدام المرشحات الملائمة اللازمة لامتصـــاص الفوتونات منخفضة الطاقة التي لا تصل عموماً للعضو الخاضع للفحص وإنما تمتص في الطبقات السطحية من جسم الإنسان، مما يزيد الجرعة الممتصة في هذه الطبقات دون جدوى.

لذلك، يجب أن تجهز جميع أجهزة الأشعة السينية المستخدمة في التشخيص بمرشحات مختلفة، بعضها ثابت وبعضها متغير (لا يقل سمكها عن حوالي 3مم ألومنيوم شكل (9-2) . فالسمك النصفي للألومنيوم يعتمد على جهد القمة. فبالنسبة للأجهزة التي تعمل في حدود 45-50 كيلوفولط يجب أن يكون سمك المرشح حوالي 1.5مم ألومنيوم. أما بالنسبة لأجهزة الدراسات الماموغرافية (فحص الثدي) التي تعمل عند جهد 30 كيلوفولط والتي تستخدم فيها الأفلام الحساسة ككاشف يكون سمك المرشح حوالي 0.5 مم ألومنيوم.

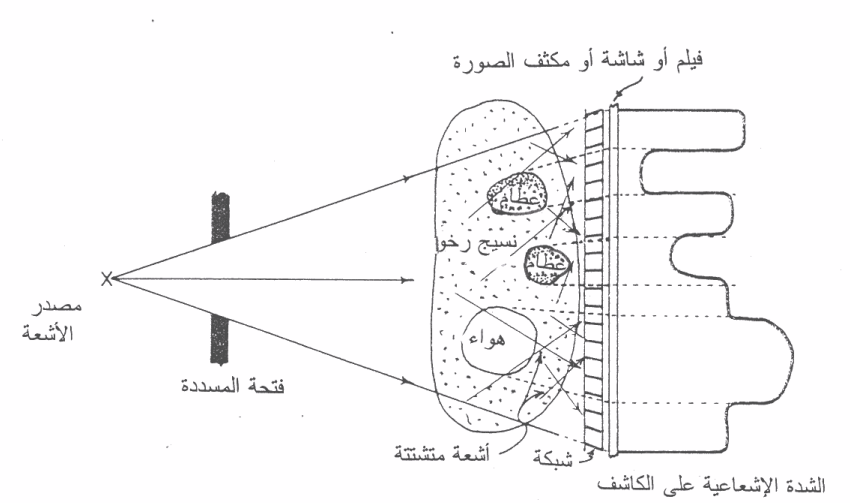
9-2-7 مستقبلات الصورة في أجهزة الأشعة السينية

بالنسبة للتشخيص بالأشعة السينية ينصب الاهتمام على كمية الأشعة التي تخترق أعضاء وأنسجة الجسم البشري. فالأنسجة البشرية المختلفة تمتص نسباً مختلفة من الأشعة السينية أي أنها توهن هذه الأشعة بنسب مختلفة، وبقياس كمية الأشعة المخترقة للنسيج يمكن معرفة التراكيب الداخلية لهذا النسيج من خلال ما يعرف باسم صورة الظل Shadow Picture لهذا النسيج التي تتمثل في كثافة الإشعاعات المخترقة له .

وتعني فيزياء الأشعة السينية التشخيصية في الوقت الحاضر بكيفية الحصول على صورة واضحة للنسيج أو العضو مع إيداع أقل كمية ممكنة من طاقة هذه الأشعة في ذلك العضو أو النسيج نظراً للمخاطر التي قد تترتب عن إيداع هذه الطاقة.

ويبين شكل (9-6) مخططاً لكيفية تكوّن صورة الأشعة للأجزاء المختلفة من جسم المريض من خلال اختلاف كمية الأشعة السينية التي تخترق الأنسجة المختلفة ويسهل تمييز المكونات المختلفة للعضو المتعرض للأشعة كالنسيج اللحمي، والدهن والأنسجة الرخوة، والفجوات الهوائية والعظام بسبب اختلاف توهين هذه المكونات للأشعة السينية،

وبالتالي اختلاف الكمية التي تخترق العضو وتصل إلى وسيلة التسجيل. ويتم استقبال الأشعة المخترقة على الوسائل التالية:



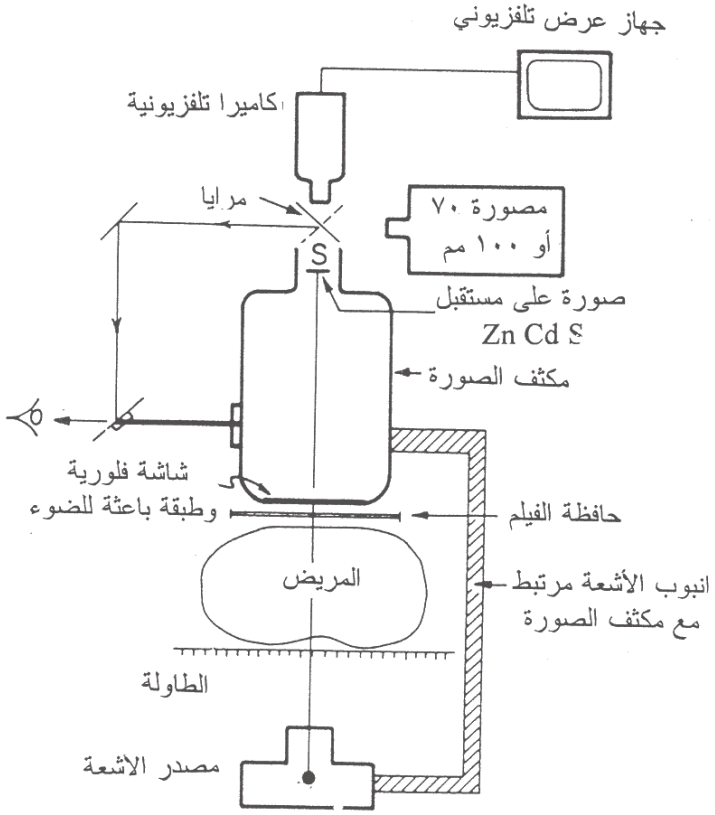
شكل (٩-٦): مخطط توضيحي لكيفية تكون صورة الأشعة

- فيلم حساس عبارة عن مادة بلاستيكية رقيقة وشفافة مكسوة بطبقة من مادة حساسة للضوء أو الأشعة السينية تزيد عتامتها بزيادة كمية الأشعة التي تصلها أي بنقص الكمية الممتصة في النسيج المقابل، وتقل عتامتها بانخفاض الكمية التي تصلها (أي بزيادة الكمية الممتصة في النسيج). وتتميز هذه الأفلام بإمكانية فحص الصورة أكثر من مرة دون تعرض المريض التصوير.
- شاشة فلورية: تظهر عليها صورة العضو المعرض لحزمة الأشعة ويشاهدها الطبيب خلال عملية تعريض العضو وتضيع الصورة بمجرد توقف حزمة الأشعة.

- مكثف الصورة: يبين شكل (9-7) صورة لأحد مكثفات الصورة التي تم تطويرها خلال السبعينيات من القرن العشرين. ويتمثل عمل مكثف الصورة في أنه عندما تخترق الأشعة السينية المكونات المختلفة للعضو الخاضع للتصوير وتسقط على الشاشة الحساسة التي تزود بمهبط يصدر إلكترونات بفعل الظاهرة الكهروضوئية (أي أن الضوء الذي ينطلق من مادة الشاشة يسقط على المهبط الكهروضوئي الذي تنطلق منه إلكترونات يتناسب عددها مع شدة الإضاءة الواقعة على الشاشة). وتسرع هذه الإلكترونات بواسطة فرق جهد كهربائي (يبلغ حوالي 25 كيلوفولط) فيولد صورة مكثفة على شاشة أخر ، ويمكن لطبيب الأشعة رؤية الصورة على الشاشة بشكل أوضح أو تسجيلها بأية وسيلة من الوسائل مثل الفلورة أو الحاسب أو غيرها.

9-3 التشخيص بالطب النووي

نتيجة لتطور إنتاج النظائر المشعة ذات الأعمار النصفية المختلفة ولتطور الطرق والأجهزة النووية أمكن استخدام هذه النظائر والطرق في تشخيص العديد من الأمراض وفي علاج عدد منها. ومنذ النصف الثاني من القرن العشرين بدأ الاستخدام الإكلينيكي للعديد من النويدات المشعة المفتوحة non sealed radionuclides في تشخيص العديد من الأمراض والظواهر المرضية داخل أقسام مستقلة في المستشفيات عرفت بأقسام الطب النووي أو ضمن أقسام فرعية تابعة لأقسام الأشعة التشخيصية .



شكل (٩-٧): مخطط توضيحي لمكثف الصورة

وعموماً، فإن مصطلح الطب النووي يعني استخدام النويدات المشعة ذات الأعمار النصفية القصيرة نسبياً لتصوير الأعضاء والأنسجة البشرية الداخلية لجسم المريض بهدف تشخيص المرض وتحديد أية ظواهر مرضية أو خلل في الوظائف الفسيولوجية لهذه الأعضاء أو الأنسجة، وذلك من خلال تصويرها بالإشعاعات التي تنطلق من النويدات بعد حقنها أو إدخالها للجسم أو بعد أخذ عينات من جسم المريض وإضافتها للنظير المشع خارج جسم المريض. وفي

أحيان نادرة قد يتضمن مصطلح الطب النووي استخدام بعض النويدات المشعة في علاج بعض السرطانات، وإن كان هذا العلاج لا يندرج تحت مسمى الطب النووي وإنما يخضع لأقسام أخرى يطلق عليها أقسام العلاج الإشعاعي.

9-3-1 استخدام النويدات المشعة في الطب النووي

مع تطور إنتاج النظائر المشعة الصنعية في المفاعلات النووية أو باستخدام أنواع معينة من المعجلات اتسع استخدام هذه النظائر في عمليات التشخيص الإشعاعي للعديد من الأمراض والظواهر الطبية وكذلك في الدراسات الطبية التي تهدف إلى التعرف على مدى كفاءة الأعضاء والأنسجة البشرية على أداء وظائفها الفسيولوجية .

ومن أهم النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي تلك التي تتميز بعمر نصفي قصير وبانخفاض طاقة إشعاعات جاما الصادرة عنها إلى الحد الذي يكفي لاستخدامها للتصوير الجامي ولا يودع جرعة كبيرة من الطاقة في جسم المريض.

ويستعرض جدول (9-1) أهم النظائر المشعة الصنعية قصيرة العمر النصفي المستخدمة في الطب النووي كمقتفيات أثر أو للتصوير الإشعاعي. ومن أهم هذه النظائر، على الإطلاق، نظير التكنيشيوم 99م الذي يتميز بعمر نصفي يبلغ 6 ساعات ويصدر إشعاعات جاما بطاقة 140 كيلو إلكترون فولط بصفة أساسية مما يمكن من استخدامها لتصوير الأنسجة والأعضاء من الداخل بعد إدخال هذه النويدة إليها. ومن الأمور التي تميز التكنيشيوم 99م على غيره أنه يعتبر حالة مثارة من التكنيشيوم 99. وحرف م يعني أنها حالة مثارة شبه مستقرة metastable حيث يبلغ عمرها النصفي 6 ساعات. وفضلاً عن ذلك، فإنه يمكن تضمين هذا النظير المشع بيسر ضمن جزيئات وتراكيب كيمائية مختلفة ومواد غروية يمكن حقنها للجسم، وبالتالي إيصالها للأعضاء أو

الأنسجة المطلوب تصويرها أو دراستها بيسر بعد أن يتركز المركب الصيدلاني الذي يتضمن النكيشيوم 99م في العضو المطلوب تصويره.

9-3-2 مولد التكنيشيوم 99 م

يسهل الحصول على التكنيشيوم 99م من مولدات خاصة تحتوي على كمية من النويدة الأم وهي المولبدنوم 99. ويتم الحصول على المولبدنوم 99 برجم المولبدنوم المستقر 98 بالنيوترونات داخل المفاعل النووي أو بواسطة مولد للنيوترونات، وذلك وفقاً للتفاعل النووي التالي:

$$^{98}\text{Mo} + {}^{1}_{o}\text{n} \longrightarrow {}^{99}\text{Mo} + \gamma$$

وينطلق فوتون جاما هذا في نفس لحظة تكون المولبدنوم داخل المفاعل أو باستخدام مولد النيوترونات.

ويبلغ العمر النصفي للمولبدنوم 99 الناتج 67 ساعة. وتوضع كمية المولبدنوم 99 المشع المتكونة داخل أنبوب من الألمنيوم التي توضع بدورها داخل درع من الرصاص لامتصاص إشعاعات جاما الصادرة عن التكنيشيوم 99م. فالموليدنوم 99 يتفكك مصدراً جسيمات بيتا السالبة ومكوناً التكنيشيوم 99م في حالة مثارة شبه مستقرة. وبمرور الوقت تنتج في الأنبوب الألومنيوم كمية من التكنيشيوم 99م يتم حلبها (أي استخلاصها بتمرير مادة سائلة معينة داخل الأنبوب الألمنيوم المحتوية على المولبدنوم ليخرج التكنيشيوم 99م.

ويتم استحلاب التكنيشيوم 99م من مولد المولبدنوم 99 باستخدام مواد صيدلانية محددة.

9-3-3 التوازن الإشعاعي في المولدات

ورد في الفصل الثاني أن هناك نوعين من التوازن الإشعاعي هما التوازن الأبدي والانتقالي. ولما كان العمر النصفي للمولبدنوم 99 يبلغ 67 ساعة والعمر النصفي لنوى التكنيشيوم 99م الوليدة 6 ساعات فإن هذا النوع من التوازن ينتمي إلى التوازن الانتقالي. أما بالنسبة لمولدات الإنديوم 113م (الذي يبلغ عمره النصفي 1.7 ساعة) الذي ينتج عن تفكك القصدير 113 (الذي يبلغ عمره النصفي 115 يوماً) فينتمي التوازن بينهما إلى النوع الأبدي.

ووفقاً للعلاقتين (2-28)، (2-30) من الفصل الثاني يسهل حساب النشاط الإشعاعي A_2 للتكنيشيوم 99 م حيث أنه سرعان ما يصل النشاط الإشعاعي للنواة الوليدة A_2 نفس قيمة النشاط الإشعاعي للنواة الأم وهي المولبدنوم 99 بعد تحضير عينة من هذه النواة الأم بحوالي خمسة أضعاف العمر النصفي أي بعد حوالي 8 – 9 ساعات من تحضير نظير القصدير 113 في المولد. أما في حالة مولدات التكنيشيوم 99م فيرتبط النشاط الإشعاعي للنويدة الوليدة A_2 بالنشاط الإشعاعي A_1 للنويدة الأم بالعلاقة:

$$A_2 / A_1 = \lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1$$

حيث λ_1 ، λ_2 هما ثابتاً التفكك للنواة الأم والوليدة بالترتيب.

وهذا يعني أنه بعد حدوث التوازن الانتقالي يصبح النشاط الإشعاعي للنويدة الوليدة A_2 أكبر من النشاط الإشعاعي للنويدة الأم بمقدار يساوي المعامل $\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$. كذلك يتناقص النشاط الإشعاعي لكلا النويدتين الوليدة والأم بنفس معدل تناقص النشاط الإشعاعي للنويدة الأم (راجع شكل 2-9). وفي حالة التكنيشيوم 99م تكون نسبة النشاط الإشعاعي A_2 للتكنيشيوم 99م إلى النشاط الإشعاعي A_1 للمولبدنوم 99 هي 110% بعد حدوث الاتزان.

مثال:

إذا كان النشاط الإشعاعي لمولد مولبدنوم 99 في لحظة ما بعد حدوث التوازن مع التكنيشيوم 99م هو 100 ميغايكرل فما هو عدد فوتونات جاما ذات الطاقة 140 ك.إ. ف المنطلقة من هذا المولد إذا علمت أن نسبة عدد هذه الفوتونات لكل اضمحلال من اضمحلالات التكنيشيوم 99م (أي المعامل f) هي 0.90 .

الحل:

المعامل f هو نسبة عدد الفوتونات المنبعثة ذات الطاقة المحددة إلى عدد الاضمحلالات التي تحدث في النظير المشع. وعلى ذلك يكون عدد الفوتونات المنبعثة من هذا المولد هو

$$N\gamma_{140} = 100 \times 10^{6} \times (110/100) \times (90/100)$$

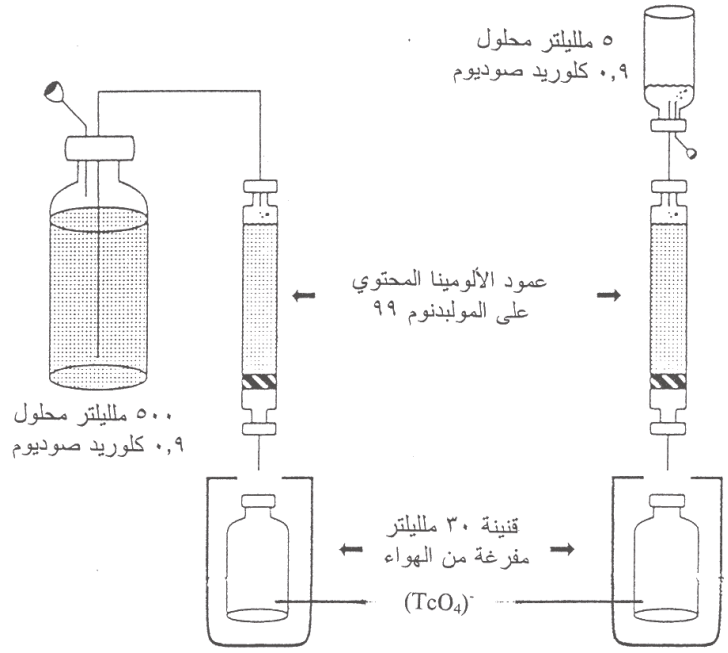
$$= 9.9 \times 10^{7} \text{ photons/sec.}$$

9-3-4 استحلاب مولدات التكنيشيوم 99 م

يستحلب نظير التكنيشيوم 99م من مولد المولبدنوم 99. ففي الوسط الحمضي يكوّن المولبدنوم 99 مركبات أنيونية في صورة أكاسيد هي $(MoO)^{2-}$ أو $(Mo_7O_{24})^{6-}$. ويكون هذان المركبان محملين في عمود المولد (أنبوب المولد) الذي يحتوي على ألومينا (Al_2O_3) مشحونة بشحنة موجبة وتخضع دائماً للغسيل بمحلول ملح بأس هيدروجيني (PH-5). ويتم حلب المولد بتمرير محلول ملح طبيعي (0.9 كلوريد صوديوم) فتخرج أيونات التكنيشيوم 99 م من الأنبوب في صورة برتكنيتيت التكنيشيوم $(^{99m}TcO_4)^-$ Technicium pertechnetate .

وهناك نوعان من مولدات التكنيشيوم 99م يستخدمان في الطب النووي هما المولد ذو العمود الرطب والآخر ذو العمود الجاف. فالمولد

ذو العمود الرطب شكل (9–8 يسار) يحتوي على خزان محلول ملحي طبيعي متصل بعمود الألومينا. وبعد استحلاب هذا المولد يبقى أثر المحلول الملحي على العمود مما يؤدي إلى تكوين نواتج تحلل مائي تعمل كعوامل مختزلة. وهذا يسبب انخفاض كمية التكنيشيوم 99م وكذلك انخفاض برتكنيتيث التكنيشيوم التي يمكن استحلابها. ويمكن مواجهة هذه المشكلة بإضافة الأكسجين O_2 إلى خزان المحلول الملحي ليعمل كعامل مؤكسد في العمود يؤدي إلى خفض تأثير العامل المختزل.



شكل (٩–٨): استحلاب مولد التكنيشيوم

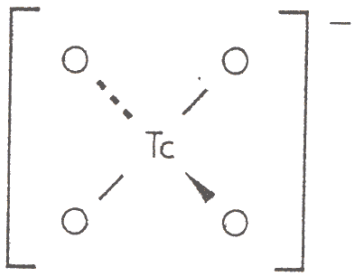
أما مولد العمود الجاف فقد تم تطويره كوسيلة لتلافي الاختزال، وبالتالي زيادة معدل انتاج برتكنيتيت التكنيشيوم، وذلك بإزالة المحلول

الملحي من العمود بعد الاستحلاب. ويستخدم مولد العمود الجاف 5–20 مللي لتر من المحلول الملحي المشحون الذي يوضع في قنينة صغيرة خارجية للمولد، ثم يتم سحب المحلول الملحي بواسطة قنينة صغيرة مفرغة من الهواء وذلك لسحب $^{99m}TcO_4$ ، ثم يمرر بعد ذلك هواء جاف خلال العمود لتجفيفه تماماً. إن وجود الهواء في العمود يدعم عملية أكسدة أي جزيئات تكنيشيوم مختزلة بحيث يعود التكنيشيوم 99 م إلى حالة التكافؤ + 7 التي يتم خلالها استحلاب برتكنيتيت التكينشيوم.

9–3–5 الصيدلانيات المشعة للتكنيشيوم 99 م

يتم الحصول على برتكنيتيت التكنيشيوم من المولد بحيث يكون التكنيشيوم في حالة تكافؤ +7، وبحيث تكون الإلكترونات السبعة الخارجية مساهمة في روابط تساهمية. وهذه هي أكثر الحالات الكيميائية استقرارا للتكنيشيوم 99م في محلول مائي. ويشبه أيون برتكنيتيت التكنيشيوم ($^{99m}TcO_4^-$) المبين صورته على شكل (9–9) أيون اليود. لذلك، يتوزع هذا الأيون في جسم الإنسان عند حقنه بكمية من برتكنيتيت التكنيشيوم ويتركز أساساً في الغدد الدرقية والغدد اللعابية والغشاء المبطن لجدار المعدة وفي الأوعية الدموية المشيمية Choroid Plexus.

لذلك، يمكن أن يستخدم برتكنيتيت التكنيشيوم في تصوير هذه الأعضاء، خاصة الغدد الدرقية. أما بالنسبة لباقي الأعضاء فإنه يتم إعادة صياغة برتكنيتيت التكنيشيوم إلى صور صيدلانية مناسبة، يختلف توزعها الحيوي على الأعضاء والأنسجة البشرية بحيث تتركز في أعضاء محددة من الجسم البشري لإمكان تصوير هذه الأعضاء. ولا يتسع هذه الكتاب لذكر الطرق المختلفة لتناول أكسدة برتكنيتيت



شكل (٩-٩): تركيب أيون برتكنيتيت التكنيشيوم $(TcO_4)^-$

التكنيشيوم 99 م وكيفية الحصول على الصيدلانيات المشعة المختلفة التي تحقن في المريض لتتركز في الأعضاء أو الأنسجة المحددة التي يراد فحصها وتصويرها.

ويستعرض جدول (9-1) بعض الفحوص والمهام التشخيصية باستخدام النويدات المشعة المفتوحة التي باتت عصب الطب النووي في وقتنا الحاضر، وأسماء النويدات المشعة المستخدمة فيها وأشكال الصيدلانيات والقيمة الاسترشادية لأقصى نشط إشعاعي للفحص الواحد بوحدة ميغابكرل.

9-3-6 الفحوص الداخلية والخارجية

بالنسبة لفحوص الطب النووي يتم في معظم الأحيان حقن المادة المشعة إلى المريض ثم متابعة انتشار هذه المادة في الأعضاء والأنسجة المختلفة. وتعرف الفحوص عندئذ بالفحوص داخل الجسم In-vivo. وهناك نوع آخر من الفحوص يتم خلاله أخذ عينة من السائل المعين أو

دم المريض وتضاف إليه المادة المشعة خارج جسم المريض. وتنتمي هذه الفحوص إلى ما يعرف باسم الفحوص الخارجية In-vitro.

وفي الفحوص التي تتم بحقن المادة المشعة داخل الجسم يستخدم لتصوير الإشعاعات المنبعثة من الجسم مصورة يطلق عليها المصورة الجامية Gamma Camera، أو مصورة آنجر Anger Camera نسبة للفيزيائي الذي اخترعها.

9-4 التصوير بالنويدات المشعة

9-4-1 المصورة الجامية أو مصورة آنغر Anger or Gamma Camera

هي الجهاز المستخدم لتصوير أماكن انطلاق إشعاعات جاما الصادرة من الجسم البشري بعد حقنه بالمادة المشعة التي تصدر هذه الإشعاعات مثل التكنيشيوم 99م أو اليود 131 أو السيلينيوم 75 أو غيرها من بواعث جاما. وتتكون المصورة الجامية المستخدمة حالياً في مجال الطب النووي من الأجزاء الرئيسة التالية:

9-4-1-1 المسددة

مسددة المصورة هي عبارة عن قرص من الرصاص يتراوح سمكه بين حوالي 0.5 بوصة حتى حوالي 2.0 بوصة ويبلغ قطره نفس قيمة قطر الكاشف الوميضي الاسطواني المستخدم للقياس. والمسددة هي وسيلة لتمرير الإشعاعات المؤينة (عادة إشعاعات جاما منخفضة الطاقة المنبعثة من جسم المريض إلى البللورة الاسطوانية للكاشف المسؤولة عن الكشف عن إشعاعات جاما الواصلة إليها وتسجيل كميتها. وتتضمن أسطوانة المسددة عدداً كبيراً للغاية من التجاويف (الثقوب) ضئيلة القطر أو بحيث تسمح بمرور الأشعة الصادرة من جسم المريض في

جدول (9–1): بعض الفحوص التشخيصية في
مجال الطب النووي والنويدات المستخدمة فيها

الفحص	اسم النويدة	الصيغة الكيميائية للنويدة	النشاط للفحص
تصوير العظام	تكنيشيوم 99م	مركبات فسفونات أو فوسفات تكنيشيوم	600
تصوير نخاع العظام	تكنيشيوم 99م	" " "	800
تصوير المخ (ساكن)	تكنيشوم 99م	TcO_4 أو DTPA	500
تصوير المخ طيفياً	تكنيشيوم 99م	" " + جلوكوهبتونات	500
سريان الدم للمخ	زينون 133	في كلوريد صوديوم	400
تصوير الغدد الدرقية	تكنيشيوم 99م	TcO_4	200
تصوير الغدة جنب الدرقية	ثاليوم 201	كلوريد ثاليوم	80
تصوير تهوية الرئتين	كربتون 81م تكنيشيوم 99م	غاز رذاذ DTPA	6000 160
تصوير الرئتين طيفياً	تكنيشيوم 99م	مع زلال بشري	200
تصوير الكبد	تكنيشيوم 99م	مادة غروية موسومة	80
تصوير الطحال	تكنيشيوم 99م	وسم بكرات حمراء	100
تصوير القلب والأوعية الدموية	تكنيشيوم 99م	معقد زلال بشري	800
تصوير عضلة القلب	تكنيشيوم 99م	مركبات فسفونات وفوسفات	600
تصوير عضلة القلب طيفياً	ثاليوم 201	كلوريد ثاليوم	100
تصوير الحالب تصوير مقطعي للحالب	تكنيشيوم 99 م تكنيشيوم 99 م	دايمركابتوسوسين DTPA	160 350

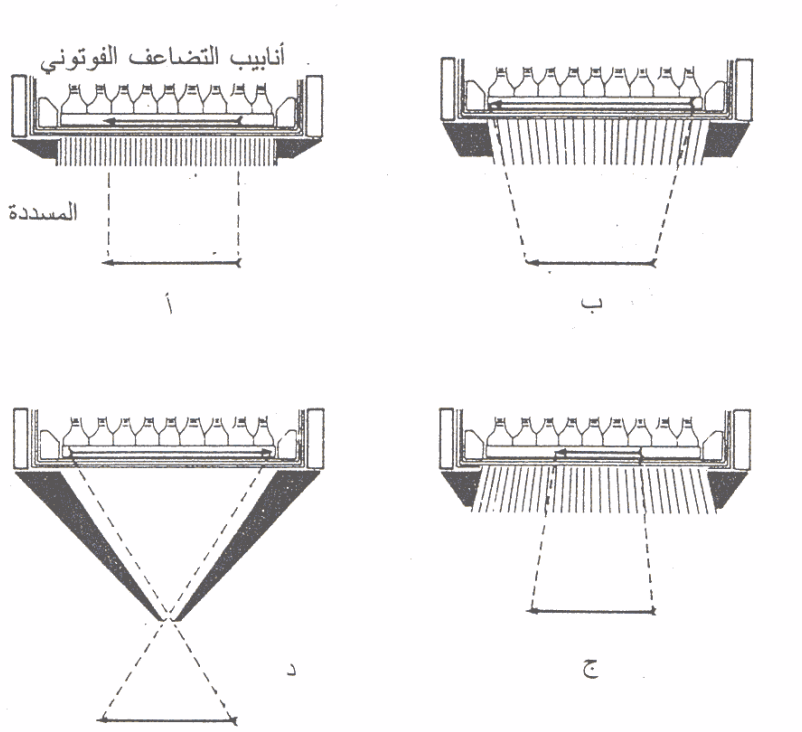
تصوير الحالب	سيلينيوم 75	سيلينوركولسترول	8
تصوير نزيف الجهاز الهضمي	تكنيشيوم 99 م	مادة غروية موسومة	400
تصوير الأورام	جاليوم 67	سترات	300
	ثاليوم 201	كلوريد	100
	تكنيشيوم 99 م	حمض دايمركابتوسوسين	400

خط مستقيم نحو بللورة الكاشف لتسجيلها فيها. أما الأشعة التي تسقط على البللورة بزاوية ما فإنها سرعان ما تمتص في رصاص المسددة ولا تصل بالتالي للكاشف ولا تسجل فيه.

ويوجد في الوقت الحالي أنواع مختلفة من المسددات التي يستعرض إحداها شكل (9–10) والتي تستخدم عادة مع مصورات جاما وهي:

أ – المسددات ذات الثقوب المتوازية كتلك المبينة في كل (9–10أ).
ب – المسددات ذات الثقوب المجمعة شكل (9–10ب).
ج – المسددات ذات الثقوب المفرقة شكل (9–10ج).
د – المسددات الثقبية شكل (9–10د) .

إلا أنه ينبغي الإشارة إلى أن المسددات ذات الثقوب المتوازية هي المسددات الأكثر استخداماً في المصورات الجامية. فالقدرة التحليلية لهذه المسددة تبدو أفضل ما يكون عند تلاقي سطح المسددة ببللورة يوديد الصوديوم، فضلاً عن ذلك فإن حساسية المصورة لا تعتمد على المسافة بين المسددة ومصدر الإشعاعات الذي يمثل العضو أو النسيج الخاضع للفحص والذي تركزت فيه المادة المشعة.



شكل (٩-١٠) مكونات المصورة الجامية وأنواع المسددات

9-4-1-2 حساسية المصورة وقدرتها التحليلية الفراغية

تعرف القدرة التحليلية الفراغية للمصورة على أنها عبارة عن قدرتها على فصل النقاط شديدة الصغر للمصدر أو فصل الخطوط الرفيعة للغاية من النشاط الإشعاعي الموجود داخل الجسم. ويعبر عن القدرة التحليلية، عادة، بما يعرف باسم العرض الكامل عند منتصف الارتفاع (راجع الفصل الرابع) FWHM . ومن الناحية العملية فإن التعبير عن العرض الكامل عند منتصف الارتفاع FWHM بالمليمتر يمثل المسافة الصغرى بين نقطتين في الفراغ يمثلان مصدرين للإشعاع بحيث يظهران في الصورة منفصلين عن بعضهما البعض.

أما حساسية كاشف المصورة فهي قدرة الكاشف المستخدم في المصورة على الكشف عند انبعاث الإشعاعات من المصدر. فكلما زادت حساسية الكاشف زادت نسبة الإشعاع التي يتم الكشف عنها في الكاشف. وبلغة عملية فإن المصورة الأعلى حساسية هي تلك التي يسجل كاشفها نسبة أكبر من الإشعاعات من نفس المصدر. وتجدر الإشارة إلى أن هناك دائماً علاقة عكسية بين حساسية المصورة وقدرتها التحليلية الفراغية. وهذا يعني أن زيادة الحساسية يرافقها دائماً نقص في القدرة التحليلية الفراغية.

9-4-1-3 البللورة الوميضية The scintillation crystal

تستخدم بللورة يوديد الصوديوم المزودة بالثاليوم NaI(Tl) في المصورات الجامية كوسيلة للكشف عن إشعاعات جاما المنطلقة من العضو أو النسيج الخاصع للتصوير. وهذه المادة شديدة الحساسية للرطوبة وتتلف بمجرد تعرضها لأية نسبة منها. لذلك، يتم إحكام غلق بللورة المصورة داخل حاوية محكمة الإغلاق من الألومنيوم أثناء تصنيعها. كذلك، تعتبر البللورة شديدة الحساسية لتغير درجة الحرارة، حيث يمكن أن يؤدي هذا التغير، خاصة إذا كان سريعا، إلى حدوث شروخ فيها مما يؤدي بدوره إلى تلفها .

وتتفاوت أقطار بللورات يوديد الصوديوم المزودة بالثاليوم المستخدمة في المصورات الجامية بين حوالي 15 سم، 60 سم. وفي الماضي كانت جميع البللورات تجهز علي شكل قرص دائري. أما في الوقت الحالي وبعد تطور عملية إنماء البللورات، بات من الممكن إنتاج بلورات مربعة أو مستطيلة المقطع، مما يوفر إمكانية زيادة مجال الرؤية. ويتراوح سمك البللورات المستخدمة حالياً بين حوالي 0.25 ، 0.50 بوصة، وفي معظم الحالات تستخدم بللورات يبلغ سمكها 0.375 بوصة.

وينبغي الإشارة إلى أنه كلما زاد سمك البلـــورة زادت حساســـية المصورة. إلا أن هذا يوثر ســـلباً علـــى القـــدرة التحليليـــة الفراغيـــة للمصورة. فاستخدام بلورات بسمك 0.375 حتى 0.5 بوصة هو أمـــر مطلوب لزيادة كفاءة (حساسية) المصورة بالنســـبة للإشـــعاعات التـــي تتجاوز طاقتها 200 ك.إ. ف. أما بالنسبة للتكنيشيوم 99م الذي يصـــدر إشعاعات جاما بطاقة 140 ك.إ. ف، في الأساس، تقل كفاءة البلـــورة التي يبلغ سمكها 0.25 بوصة عن تلك التي يبلغ سمكها 0.50 بوصـــة بحوالي 15% ، إلا أن البللورة الأقل كثافة تعطي فصلاً فراغياً أفضـــل للصورة.

9-4-1-4 أنابيب التضاعف الفوتوني

تستخدم في المصورة الجامية شبكة مكونة من عدد كبيـــر مـــن أنابيب التضاعف الفوتوني لتسجيل الوميض الذي ينـــتج عـــن تفاعـــل إشعاعات جاما الساقطة على البلورة مع هذه البلـــورة. ويتحـــدد العـــدد الإجمالي من هذه الأنابيب في المصورة الواحـــدة مـــن واقـــع الأبعـــاد الهندسية لبلورة يوديد الصوديوم (وأساساً قطرها) وقطر كل أنبوب من الأنابيب المستخدمة.

وفي المصورات القديمة ذات البلورة الدائرية كانـــت الأنابيـــب ترتب في صورة هندسية سداسية يتحدد فيها عدد الأنابيب بالعلاقـــة $6n+1$. وبذلك كان عدد الأنابيب أما 7 ($6\times1+1=7$) أو 19 ($6\times3+1=19$). أما في الوقت الحالي فتصنع البلورات بمقاسات أكبر وبالتالي يبلغ عـــدد الأنابيـــب إمـــا 37 أنبوبـــا ($6\times6+1=37$) أو 55 أنبوبـــا ($6\times9+1=55$)، أو 61 ($6\times10+1=61$) أنبوبا. وعموماً، فإنه بزيـــادة عدد أنابيب التضاعف الفوتوني تتحسن كثيرا القدرة التحليلية الفراغيـــة فضلاً عن تحسن خطية المصورة. كذلك، تطـــورت صـــناعة أنابيـــب التضاعف الفوتوني في الوقت الحالي واتخذت مقاطعها شـــكلاً سداســـياً

بدلاً من الشكل المستدير، الأمر الذي يؤدي إلى استغلال كافة سطح البلورة وبالتالي إلى زيادة كفاءة تسجيل الإشعاعات وزيادة حساسية المصورة. ويبين شكل (9–10) مخططاً للأوضاع المتبادلة لكل من المسددة والبلورة وأنابيب التضاعف الفوتوني في المصورة الجامية.

9–4–2 تكوين الصورة

تتكون الصورة في المصورة بأسلوبين مختلفين. ففي المصورات التماثلية القديمة Analog Cameras تتكون صورة فوتوغرافية بطريقة مباشرة أثناء عملية التصوير. أما في الأنواع الحديثة من المصورات سواءً التماثلية أو الرقمية فيتم تكوين الصورة على شاشة الحاسب مباشرة من خلال عملية تراكم البيانات بالأسلوب التماثلي Analogous أو الرقمي Digital . ففي المصورات التماثلية القديمة يتحكم في تكون الصورة معداد ميقاتي Scaler –timer يقوم ببدء التخزين لتكوين الصورة ثم ينتهي التجميع بعد فترة زمنية محددة. وتكوّن المصورة الصورة خلال زمن محدد (يتم تحديد زمن التجميع مسبقاً) أو خلال فترة زمنية تتحدد بقياس عدد النبضات المسجلة في كل وحدة مساحة من الصورة (1سم2)، وبمجرد الوصول إلى عدد نبضات معين تتوقف عملية التصوير.

أما في المصورات الحديثة فيتم استقبال الصورة بواسطة الحاسب الآلي الذي يحدد إما زمن التصوير أو كثافة الإشعاعات المسجلة في مواقع الصورة المختلفة.

9–4–3 طومغرافيا الانبعاث البوزتروني

Positron Emission Tomography PET

في هذه التقنية تم تطوير أسلوب للكشف عن الإشعاعات المنبعثة من العضو أو النسيج البشري الخاضع للفحص بتكوين صورة مقطعية لمستوى معين في هذا العضو أو النسيج البشري الخاضع للفحص.

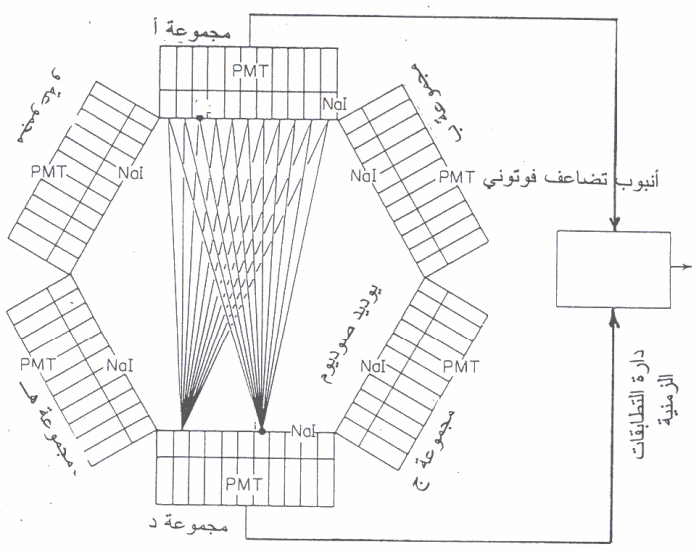
وتستند هذه التقنية على الظاهرة المعروفة بفناء البوزترون. فالبوزترون الذي يتميز بكتلة مساوية تماماً لكتلة الإلكترون وبشحنة مساوية تماماً لشحنة الإلكترون إلا أنها موجبة، يعرف بأنه جسيم مضاد للإلكترون. ومن خصائص الجسيم وجسيمه المضاد أنهما عندما يقتربان من بعضهما البعض وتكون سرعتاهما صغيرة نسبياً فإنهما سرعان ما يفنيان معاً ككتل مادية وتتحول كتلتاهما إلى طاقة تتمثل في فوتونين، تبلغ طاقة كل واحد منهما 511 ك.إ. ف (حيث أن كتلة الإلكترون أو البوزترون تكافئ هذا المقدار من الطاقة، وفقاً لعلاقة تكافؤ الكتلة والطاقة لأينشتين). وعندما يحدث الفناء لكل من الإلكترون والبوزترون عند اقترابهما بسرعة منخفضة ينطلق الفوتونان في اتجاهين متضادين تماماً.

ومع تطور المعجلات النووية المنتجة للنظائر المشعة التي تتفكك مع انبعاث البوزترون (أي تفكك بيتا الموجب – راجع الفصل الثاني) يمكن الآن إنتاج عدد من هذه النظائر في المستشفيات التي تتوفر فيها معجلات السيكلوترون. وبالفعل يتم في الوقت الحاضر إنتاج عدد من هذه النظائر مثل الكربون–11 (بعمر نصف 20.3 دقيقة) والنيتروجين–13 (بعمر نصفي 9.97 دقيقة) والأكسجين–14 (بعمر نصفي 71 ثانية) والأكسجين 15 (بعمر نصفي 124 ثانية) وغيرها. ويتم تحضير هذه النظائر في صور كيميائية مختلفة مثل أول أكسيد الكربون Co وثاني أكسيد الكربون Co_2 والأمونيا NH_3 وغيرها. ويتم تضمين هذه الجزيئات في أحماض أمينية مختلفة وهي الأحماض المطلوبة لتفاعلات البروتينات والتحامها، مما يساعد على دراسة العديد من العوامل الفسيولوجية ووظائف الأعضاء، وكذلك دراسة مدى فاعليتها في أداء وظائفها.

وعند إدخال بواعث البوزترونات ضمن الحمض الأميني للعضو أو النسيج المعين تنبعث منها البوزترونات التي سرعان ما تتفاعل مع

الخلايا المحيطة بموقع الانبعاث وتفقد طاقاتها على هذه الخلايا، وبالتالي تتحول البوزترونات السريعة المنبعثة بعد أن تنخفض طاقتها إلى بوزترونات بطيئة. وعند اقتراب هذه البوزترونات البطيئة من أي إلكترون محيط سرعان ما تتفاعل معه ويحدث الفناء وينطلق فوتونين يحمل كل منهما طاقة مقدارها 511 ك.إ.ف، وينطلقان في اتجاهين متضادين وفي نفس اللحظة (بفارق زمني لا يزيد على 10^{-15} ثانية).

وعند وجود مصورة محيطة بالجسم من جميع الجهات كالمبينة في شكل (9–11) وتسجيل الحدثين المتطابقين زمنياً مع بعضهما باستخدام دارة تطابق زمني فإنه يمكن رسم صورة مفصلة لتوزيع بواعث البوزترونات داخل العضو أو النسيج تعرف بالصورة المقطعية للانبعاث البوزتروني.



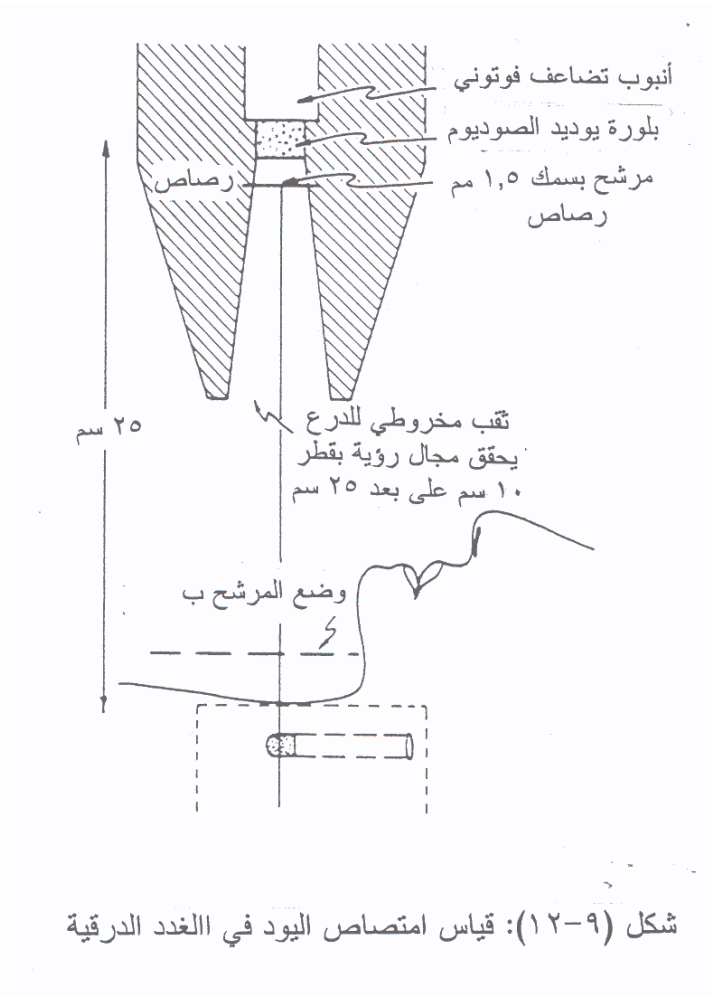
شكل (٩–١١): مخطط المصورة الطموغرافية للإنبعاث البوزتروني

وتجدر الإشارة إلى ضرورة توفر عدد من الأزواج المتقابلة من الكواشف حول العنصر الخاضع للفحص مثل الـزوج (أ، د)، والـزوج (ب، هـ)، والزوج (ج، و) على الشـكل (9-11)، حتـى لا يفقـد أي حدث تطابقي بين أي زوج من الفوتونـات يطيـر فـي أي اتجـاهين متضادين.

9-5 الدراسات التشخيصية بالنويدات المشعة

9-5-1 دراسة امتصاص اليود في الغدد الدرقية

تعتبر الدراسات التشخيصية بالنويدات المشعة في الوقت الحاضر أحـد أفرع الطب النووي الهامة. ومن أمثلة هذه الدراسات دراسة امتصاص الغدد الدرقية لليود وهي العملية المعروفة باسم امتصاص اليود في الغدد الدرقية Iodine Uptake . وفي هذه العملية يعطى المريض (عن طريـق البلع) جرعة من نظير اليود-131 المشع يبلـغ نشـاطها حـوالي 10 ميكروكوري في صورة ملح من أملاح الصوديوم كما يتم تحضير كمية مماثلة تماماً في أنبوب اختبار لاستخدامها كمعيار للمقارنة. وبعد مرور 24 ساعة على ابتلاع المريض للجرعة يتم وضع رقبة المريض (شكل 9-12) أمام جهاز عداد إشعاعات اليود (أو ما يعـرف باسـم راصـد اليود) Iodine monitor . ويتكون الجهاز من بلورة يوديـد الصـوديوم ككاشف وميضي مركبة على أنبوب تضاعف فوتوني. وتثبـت رقبـة المريض بحيث تكون الغدد الدرقية على مسافة 25 سـم مـن سـطح الكاشف الموضوع داخل درع من الرصاص. وفائدة هذا الـدرع هـي خفض إشعاعات جاما المنطلقة عن الخلفية الإشعاعية الموجـودة فـي البيئة. كذلك، يوضـع أمام الكاشف مباشرة (أي في نفس الدرع وبـين الكاشف والمريض طبقة من الرصاص تستخدم كمرشح لا يقل سـمكها عن 1.5 ملليمتر.



شكل (٩-١٢): قياس امتصاص اليود في االغدد الدرقية

ويتم وضع العينة المعيارية داخل اسطوانة من مادة البلاســتيك المماثلة للنسيج البشري (مادة اللوسايت) بحيث تماثل تماماً وضع الغدد الدرقية حول العنق. ويتم بعد ذلك إجراء القياسات للنشاط الإشــعاعي من العينة المعيارية ومن رقبة المريض، كل على حدة، بشرط أن تكونا موضوعتين في نفس الوضع الهندسي بالنسبة للكاشف للحصول علــى الدقة الواجبة. ويتم إجراء أربعة قياسات هي:

أ- معدل العد من رقبة المريض بوحدة نبضة لكل دقيقة ولتكن هذه القراءة هي N.

ب- وضع شريحة من الرصاص طولها 10سم وعرضها 10سم وسمكها 1.25سم فوق رقبة المريض (على حامل حتى لا تضغط على الرقبة) ويتم قياس معدل عد الخلفية الإشعاعية بوحدة نبضة لكل دقيقة وتمثل هذه القراءة الخلفية N_b .

ج- يكرر القياس المذكور في (أ) أعلاه، ولكن بعد إبعاد المريض واستبدال رقبته بالعينة المعيارية في نفس الوضع وعلى نفس المسافة، وبذلك يتم تعيين معدل العد من العينة المعيارية S بوحدة نبضة لكل دقيقة.

د- وضع الشريحة الرصاص المذكورة في (ب) عالية فوق العينة وأخذ معدل العد للخلفية من المصدر المعياري S_b .

بعد ذلك يحدد معدل امتصاص الغدد الدرقية من العلاقة:

$$T.U\ \% = \{ (N - N_b) / (S - S_b) \} \times 100\ \%$$

حيث T. U معدل الامتصاص % Thyroid Uptate .

ويمثل المقدار $(N-.N_b)$ معدل العد الصافي من اليود-131 الذي امتص داخل الغدد الدرقية بعد إبعاد المؤثرات الخارجية الناتجة عن البيئة المحيطة. أما $(S - S_b)$ فيحدد نفس المعدل الصافي ولكن من المصدر المعياري المعلوم. وبذلك، يمكن تعيين معدل امتصاص اليود 131 خلال الأربعة والعشرين ساعة من تناول الكمية عبر البلع وبالتالي تعيين كفاءة الغدد على امتصاص اليود وتركيزه فيها، وبالتالي، معرفة بعض الأعراض المرضية فيها.

مثال:

في دراسة لامتصاص اليود 131 في الغدد الورقية كانت القراءات كالمبينة في الجدول التالي، فإذا كانت كمية اليود-131

المعطاة للمريض 10 ميكروكوري، والكمية في العينة المعيارية بـــنفس النشاط الإشعاعي. عين نسبة امتصاص الغدد الدرقية لهذا المريض من اليود–131، والقيمة المطلقة الممتصة.

N	N_b	S	S_b
500	170	2800	180

الحل:

$$T.U\ \% = \{ (500 - 170) / (2800-180) \} \times 100$$

$$= 12.6\ \%$$

$$T.U = 0.126 \times 10$$

$$= 1.26\ \mu Ci$$

وتجدر الإشارة إلى أنه لخفض نسبة الخطأ في القياسات ينبغـــي أن تجري جميع القياسات الأربعة بحيث يكون الخطأ الإحصائي في كل منها صغيراً ولا يتجاوز 3 % . ومعنى ذلك أن يتم اختيار زمن القياس لأي من هذه القياسات بحيث لا يقل عدد النبضات المسجلة خلال كـــل قياس عن حوالي 2500 نبضة ثم يحسب منها معدل العد بقسمة العـــدد على زمن القياس بالدقيقة .

9–5–2 دراسة حجم البلازما للمريض

تتم هذه الدراسة عادة باستخدام مطياف وميضي بئري من يوديد الصوديوم المزود بالثاليوم NaI(Tl) أو مطياف جرمانيوم بئري عالي النقاوة (إن تيسر) well type hyper- pure germanium type لعد كميـــة إشعاعات جاما المنطلقة من عينة دم المريض ومن المصدر المعياري. ويتم وضع عينة البلازما المسحوبة من المريض وعينة سائلة تتضـــمن

كمية من النويدة المشعة المعيارية بنشاط إشعاعي معلـــوم بدقـــة فـــي انبوبتي اختبار من نفس النوع والحجم والشكل، وبحيث يكـــون حجمـــا المصدر المعياري السائل والبلازما متساويين تماما (وليكن حجـــم كـــل منهما 3 ملليلتر)، ويتم عد النشاط الإشعاعي في الأنبـــوبتين بالتتـــابع. والسبب في استخدام الكواشف ذات البئر هو إحاطة العينـــة الخاضـــعة للقياس من جميع الجهات (عدا فتحة البئر)، لزيادة كفاءة الكاشـــف (أي حساسيته) لتسجيل إشعاعات جاما المنطلقة من عينة البلازمـــا والعينـــة المعيارية في جميع الاتجاهات. ولخفض الخطأ الذي ينتج عـــن خلفيـــة إشعاعات جاما الموجودة طبيعيا في البيئة، يجـــب أن يحـــاط الكاشـــف وبداخله أي من العينتين بقلعة اسطوانية من الرصـــاص لايقـــل ســـمك جدارها الاسطواني أو قاعها أو غطائها عن 5–10 سم.

ولتعيين حجم بلازما الدم للمريض يحقن المريض وريديا بمـــادة زلالية سائلة موسومة بكمية من اليود–131 (RISA) معلومـــة النشـــاط الإشعاعي (وليكن 10 ميكروكوري)، وتوضع كمية مساوية تماما مـــن المادة الزلالية الموسومة في أنبوب الاختبار كعينة معيارية، بحيث يكون النشاط الإشعاعي المحقون في المريض مساو تماما للنشاط في العينـــة المعيارية، ثم تخفف العينة المعيارية بالماء بحيث يصبح حجمهـــا بعـــد التخفيف 2000 ملليلتر . وبعد حقن المريض بمدة 10 دقائق يتم سحب 10 ملليلتر من دم المريض المحقون. ويقصد من وراء الانتظار لمـــدة عشر دقائق توزع المادة المشعة توزعا متجانسا علـــى كـــل البلازمـــا المكونة لدم المريض. وبعد سحب عينة الدم (10 ملليلتر) يـــتم فصـــل كرات الدم الحمراء منها باستخدام جهاز طرد مركزي. وبعـــد فصـــل البلازما يوخذ حجم معلوم منها (وليكن 3 ملليلتر) ويوضع في انبـــوب الاختبار. بعد ذلك تخضع كل من عينة البلازما والعينة المعيارية للعـــد لنفس الوقت على المطياف، وليكن معدل العد (بوحدة نبضـــة/ دقيقـــة) لعينة البلازما هو $C_p = N_p / t$ ، حيث N_p هوعدد النبضات المسجلة من عينة البلازما خلال زمن قياس مقداره t دقيقة، ومعـــدل العـــد للعينـــة

المعيارية هو $C_s = N_s / t$ حيث N_s هو عدد النبضات المسجلة من العينة المعيارية خلال الزمن t . وفي نفس الظروف يتم قياس معدل عد الخلفية C_b المسجلة في الكاشف من الخلفية الإشعاعية الطبيعية داخل القلعة. ويفضل أن تقاس الخلفية لفترة طويلة نسبيا من الزمن t_b ثم يحسب معدل العد C_b كخارج قسمة عدد النبضات المسجلة N_b خلال زمن قياس الخلفية على مقدار هذا الزمن t_b بالدقيقة.

وحيث أن حجم بلازما الدم للإنسان المعياري يقدر بحوالي 3000 ملليلتر، فإنه يسهل حساب حجم البلازما للمريض V الذي أخذت منه عينة الدم بدلالة كل من معدل عد عينة البلازما C_p ، ومعدل عد العينة المعيارية C_s ، ومعدل عد الخلفية الإشعاعية C_b ، وحجم العينة المعيارية بعد التخفيف V_s (1000 أو 2000 ملليلتر) من العلاقة البسيطة التالية:

$$V = V_s \, x(C_s - C_b) / (C_p - C_b)$$

وهنا تجدر الإشارة إلى أن سبب تخفيف العينة المعيارية هو أن يكون تركيز النشاط الإشعاعي فيها قريبا من تركيزه في البلازما حتى يمكن تلافي تصحيح الأخطاء الكبيرة الناتجة في معدل العد للعينتين بسبب الزمن الميت للمطياف المستخدم، التي تنتج عادة عن وجود تركيزات شديدة التفاوت في العينتين.

مثال:

في دراسة لقياس حجم البلازما لمريض حقن هذا المريض في الوريد باليود–131 بنشاط إشعاعي مقداره 10 ميكروكوري وخففت العينة المعيارية ألف مرة بحيث أصبح حجمها 1000 ملليلتر، وبعد الفترة اللازمة تم سحب 10 ملليلتر من دم المريض وتم فصل البلازما وأخذت عينتان متساويتا الحجم من العينة المعيارية المخففة ومن البلازما مقدارهما 3 ملليلتر وعدت العينتان على المطياف فكانت معدلات العد كالآتي: 3306 نبضة/دقيقة للعينة المعيارية، 1462

نبضة/دقيقة لعينةالبلازما، 180 نبضة/ دقيقة للخلفية الإشعاعية. احسب حجم البلازما لهذا المريض.

الحل:

حيث أن معامل التخفيف هو 1000 يكون حجم البلازما لهذا المريض هو:

$$V = 1000 \times (3306 - 180) / (1462 - 180)$$
$$= 2438 \quad ml$$

9-6 حساب الجرعة الناتجة عن حقن مادة مشعة في الجسم

تعتبر عملية حساب الجرعة المترتبة عن حقن مادة مشعة داخل الجسم البشري عملية شديدة التعقيد، وتتطلب معرفة العديد من البارامترات الخاصة بالنويدات المشعة المحقونة وأنماط تفككها ونسبة تركيزها والقيم f لخطوطها الطيفية وطاقة كل خط من هذه الخطوط. وقد تشكلت لهذا الغرض لجنة من الفيزيائيين والبيولوجيين أطلق عليها اسم لجنة ميرد Medical Radiation Internal Doses MIRD . وتحملت هذه اللجنة مسؤولية تنفيذ حسابات هذه الجرعات بالدقة الواجبة. وسوف يرد في هذه الفقرة شرح مختصر للمبادئ الفيزيائية الأساسية اللازمة لحساب هذه الجرعة وذلك باستخدام النكيشيوم 99م، كأحد أبسط الأمثلة على أسلوب حساب الجرعات الداخلية من النويدات المحقونة.

9-6-1 البيانات النووية المطلوبة

لحساب الجرعة الداخلية الناتجة عن حقن نويدة مشعة للجسم البشري يجب معرفة جميع البيانات الفيزيائية لهذه النويدة، مثل أنماط اضمحلالها وطاقات خطوط جاما الطيفية المنبعثة عن هذه النويدة والشدد النسبية لهذه الخطوط أو قيمة المقدار f لكل خط من هذه الخطوط. ويمثل المقدار f لخط ما نسبة عدد الفوتونات المنطلقة في اضمحلال جاما بالطاقة المحددة، وللنويدة المعينة، بالنسبة للنشاط

الإشعاعي لهذه النويدة. فمثلاً، عندما يقال أن قيمة f لخـــط جامـــا ذات الطاقة 140 ك.إ.ف المنبعث عن التكنيشيوم 99 م هو 0.986 فإن هذا يعني أنه عند اضمحلال 1000 نواة من نوى التكنيسيوم 99 م ينبعـــث 986 فوتونا بطاقة 140 ك.إ.ف. ويبين جدول (9–2) البيانات النووية لتفكك التكنيشيوم 99م .

والطاقة الإجمالية الموزونة لكل اضمحلال مـــن اضـــمحلالات التكنيشيوم 99م هي عبارة عن مجموع حاصلات ضرب طاقة كل خط من الخطوط في نسبة احتمال انبعاث الفوتون بهذه الطاقة f ، أي أن:

$$E = \sum E_\gamma x\ f_i$$

$$=0.0021 \times 0.986 + 0.1405 \times 0.986 + 0.1426 \times 0.014$$

$$= 0.1426 \quad MeV$$

ويمكن تحويل الطاقة المتحصلة لكـــل اضـــمحلال مـــن نظـــام الوحدات النووية إلى النظام المعياري العالمي لوحـــدة الطاقـــة، حيـــث تساوي:

$$E = o.1426 \times 1.6 \times 10^{-13} = 2.28 \times 10^{-14} \quad Joules$$

جدول (9–2): بيانات خطوط إشعاعات جاما
الناتجة عن اضمحلال التكنيشيوم 99م

رقم الانتقال	طاقة الفوتون Eγ(ك.إ.ف)	القيمة f_I	القطبية ونسبة التحول K إلى L
1	2.10	0.986	E3
2	140.5	0986	M2
3	142.06	0.014	M4
الطاقة الإجمالية الموزونة لكل اضمحلال = 142.6 ك.إ.ف			

ولتحديد باقي الطاقات المنقولة للعضو أو النسيج فإنه ينبغي معرفة بعض الخصائص الأخرى لقطبية إشعاعات جاما من حيث النوعية المغنطيسية أو الكهربائية، وكذلك من حيث المرتبة. وقد استلت هذه البيانات من جداول لجنة MIRD للتكنيسيوم 99 م، وهي مبينة في العمود الرابع من جدول (9–2). كذلك، ينبغي معرفة نسب التحول الداخلي Conversion factors بالنسبة للقشرات K، L ونسبة التحول من القشرة K إلى القشرة L . ومعرفة هذه البارامترات ضروري لحساب عدد إلكترونات التحول الداخلي وعدد الثقوب المتبقية في هذه القشرات، نتيجة لإعادة توزع الإلكترونات في القشرات وانبعاث الأشعة السينية المميزة أو انبعاث إلكترونات أوجر. ويمكن حساب مجمل الطاقة المنقولة للنسيج عن اضمحلال واحد من اضمحلالات التكنيشيوم 99 م. ويستعرض جدول (9–3) المستعار من بيانات لجنة MIRD هذه البيانات. ومن هذا الجدول يتضح أنه بالنسبة لفوتونات جاما ذات الطاقة 2.1 ك.إ.ف (المبينة في الجدول باسم جاما1) فإنها لا تخرج من الذرة وإنما تحدث تحولاً داخلياً ينطلق على أثره إلكترون من القشرة L حيث لا تكفي الطاقة لنزع إلكترون من القشرة الأولى K من ذرة التكنيشيوم بحيث تنطلق الإلكترونات بطاقة 1.6 ك.إ.ف. أما بالنسبة للفوتونات ذات الطاقة 140.5 ك.إ.ف والمبينة في الجدول تحت اسم جاما (2) فإنها تنطلق من النواة باحتمالية f = 0.878 من الانتقالات بكامل طاقتها وهي 140.5 ك.إ.ف، كما تؤدى إلى إصدار إلكترونات تحول داخلي من القشرات K ، L، M . وبالنسبة للفوتونات جاما (3) التي تنطلق بطاقة 142.06 ك.إ.ف من النواة فإنها تسلك نفس سلوك جاما (2) تقريباً. أما باقي الجدول فيبين توزع الطاقات التي تنتقل بواسطة إلكترونات التحول الداخلي من القشرات K، L، M للتكنيشيوم 99م ومع الأشعة السينية نتيجة لإعادة توزع إلكترونات الذرة، وكذلك مع إلكترونات أوجر (راجع الفصل الثاني).

جدول (9-3): بيانات التكنيشيوم 99 م مستلة من جداول MIRD)

البيان			ثابت الجرعة التوازني		
مقدار الطاقة	مقدار الطاقة (ك.إ.ف)	النسبة (f)	راد لكل ميكروكوري× ساعة	جول لكل تفكك ×10-13	متنقل
جاما (1)	2.10	صفر	000	000	
إلكترون تحول داخلي من L	1.60	0.986	0.0035	0.0026	
جاما (2)	140.5	0.8787	0.2630	0.1980	0.0980
إلكترون تحول داخلي من K	119.4	0.0913	0.0232	0.0174	
- من L	137.7	0.0118	0.0034	0.0026	
- من M	140.0	0.0039	0.0011	0.0008	
جاما (3)	142.6	0.0003	0.0011	0.0001	0.0001
إلكترون تحول داخلي					
- من K	121.5	0.0088	0.0022	0.0016	
- من L	139.8	0.0035	0.0010	0.0007	
- من M	142.2	0.0011	0.0003	0.0002	
أشعة سينية $k_{\alpha 1}$	18.3	0.0441	0.0017	0.0013	
أشعة سينية $k_{\alpha 2}$	18.2	0.0221	0.0008	0.0006	
أشعة سينية $k_{\beta 1}$	20.6	0.0105	0.0004	0.0003	
إلكترون أوجر KLL	15.4	0.0152	0.0005	0.0004	
إلكترون أوجر KLX	17.8	0.0055	0.0002	0.0002	
إلكترون أوجر KLM	1.90	0.1093	0.0004	0.0003	
إلكترون أوجر MXY	0.40	1.2359	0.0011	0.0008	
الإجمالي			0.3029	0.2279	0.0981

أما العمود الرابع فيحدد الطاقة المودعة في جرام راد لكل ميكروكوري.ساعة. ويعرف هذا المقدار باسم ثابت جرعة التوازن Equilibrium Dose Constant Δ نظراً لأنه عند حساب هذه الكمية تم افتراض أن النظير المشع يتوزع توزعاً متجانساً في عضو أو نسيح كبير بحيث تمتص جميع الفوتونات والجسيمات التي تصدر عن النظير المشع بالكامل داخل هذا العضو أو النسيج ولا يخرج أي منها خارجه.

ومن المعروف أن:

1 ميكروكوري.ساعة = $3.7\times10^{4}\times3600$

= 1.332×10^{8} اضمحلال

وأن 1 جرام راد هو:

1 جرام×100 إرغ/جرام = 100 إرغ

= 10^{-5} جول

= 10^{-5} غراي. كيلوجرام

(راجع الفصل السابع). وعلى ذلك فإن:

1 جرام راد/ميكروكوري.ساعة = 10^{-5} /1.332×10^{8}

= 7.51×10^{-14} جول/اضمحلال.

مثال:

من جدول (9–3) يتبين أن فوتونات جاما (2) تصدر عن التكنيشيوم99 م بطاقة 140.5 ك.إ.ف، وبنسبة f تساوي0.8787 لكل اضمحلال، عيّن ثابت جرعة التوازن Δ لهذا الخط وعبر عنه بوحدة جرام راد لكل ميكروكوري ساعة.

الحل:

$\Delta = 0.1405 \times 0.8787 = 0.1235$ MeV/dis

$= 0.1235 \times 1.6 \times 10^{-13}$

$= 1.975 \times 10^{-14}$ Joule /dis

$= 1.975 \times 10^{-14} / 7.51 \times 10^{-14}$

$= 0.263$ gm.rad / μ Ci .h

9-6-2 حساب الجرعة الداخلية

فضلاً عن البيانات الواردة في جدول (9-3) يتطلب حساب الجرعة المودعة في عضو أو نسيج ما معرفة بعض المعلومات البيولوجية مثل العمر البيولوجي النصفي (راجع الفصل العاشر) والمعلومات التشريحية للعضو أو النسيج، بما في ذلك شكل هذا العضو أو النسيج وحجمه. وقد يختلف حجم وشكل العضو أو النسيج من

جدول (9-4): الجرعة الممتصة لوحدة النشاط الإشعاعي المتراكم في بعض الأعضاء البشرية

النظير المشع وعمره النصفي	العضو المتراكم فيه النشاط	جرعة الأعضاء المجاورة		
		العضو	راد/ميكروكوري. ساعة	جراي/ بكرل. ثانية
تكنيشيوم 99م 6 ساعات	الكبد	الكبد	4.6×10^{-5}	3.45×10^{-15}
		المبيض	4.5×10^{-7}	3.38×10^{-17}
		الخصيتين	6.2×10^{-8}	4.66×10^{-18}
		النخاع الأحمر	1.6×10^{-6}	1.20×10^{-16}
	الغدد الدرقية المثانة	الغدد الدرقية	2.5×10^{-3}	1.73×10^{-13}
		الغدد الدرقية	2.1×10^{-9}	1.58×10^{-19}
يود- 13 193 ساعة	الغدد الدرقية	الغدد الدرقية	2.2×10^{-2}	1.65×10^{-12}

هذا الجدول مستل من جداول MIRD.

مريض لآخر إلا أنه تستخدم بعض المقاييس المعيارية الخاصة بأحجام وأشكال الأعضاء البشرية للإنسان المعياري، وهو إنسان حددته اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية يبلغ طوله 175سم وكتلته 70 كجم. وباستخدام نموذج الإنسان المعياري ومنهج مونت كارلو لحساب كـمية الفوتونات الممتصة في العضو وكمية الإشعاعات المتشتتة عليه يمكـن حساب الجرعة المودعة في العضو أو النسيج المعين. ويعتبر حسـاب الجرعة بهذا الأسلوب شديد التعقيد إلا أن البـرامج الحاسـوبية (مثـل برنامج مونت كارلو) قد يسرت عملية الحساب كثيراً . ويبـين جـدول (9–4) بعض نتائج هذه البرامج بالنسبة للتكنيسيوم 99م .

مثال:

احسب الجرعة المتوسطة الناتجة في كل من الكبد والمبيض الناتجة عن حقن 1 مللي كوري من التكنيشيوم 99م في المريض إذا كان هذا النظير محقون في صورة مركب يتركز بالكامل في الكـبد تركزاً متجانساً باعتبار أن العمر البيولوجي النصفي أكثر بكثير من العمر النصفي الفيزيائي الذي يبلغ 6.02 ساعة.

الحل:

من المعلوم أي متوسط العمر لنظير مشع يساوي العمر النصـفي مقسوماً على Ln2 (راجع الفصل الثاني). بذلك، يكون متوسط العمـر ι للكمية المحقونة التي تتركز في الكبد هو:

$$\iota = 6.02 \times Ln2 = 8.685 \text{ hours}$$

وبذلك، يمكن حساب النشاط الإشعاعي A المتراكم في الكبد عـن الكمية المحقونة طوال العمر المتوسط، وهذا النشاط هو:

$$A = 3.7 \times 10^7 \times 8.685 \times 3600$$

$$= 1.1568 \times 10^{12} \text{ dis (or Bq.sec)}$$

وباستخدام جدول (9–4) تكون الجرعة المودعة في الكبد والناتجة عن الكمية المحقونة هي:

$$D = A \times 3.45 \times 10^{-15}$$

$$= 3.99 \text{ Gray}$$

أما الجرعة المودعة في المبيض عن هذا الحقن فهي:

$$D = A \times 3.38 \times 10^{-1} = 3.91 \times 10^{-2} \text{ Gy}$$

9–7 استخدام النظائر المشعة والإشعاعات في العلاج

مثلما يمكن أن تستحث الإشعاعات المؤينة السرطانات المختلفة في الأنسجة السليمة تستخدم هذه الإشعاعات والنظائر المشعة لمعالجة بعض السرطانات وقتل خلاياها. فعلى سبيل المثال نجح استخدام نظير اليود–131 المشع الذي يحقن بجرعة محددة في جسم المريض أو يعطى مع الماء عن طريق البلع في علاج نسبة عالية من سرطان الغدد الدرقية في الحالات التي لا يمكن استئصالها جراحيا أو التي يتكرر نموها بعد الجراحة، كما يستخدم هذا النظير في علاج عدد من الأمراض المرتبطة بهذه الغدد. كذلك، يستخدم الحقن بنظير اليود–131 المشع أو نظير الفسفور–32 المشع في علاج بعض أنواع اللوكيميا (سرطان الدم)، وأصبح استخدام بعض النظائر المشعة داخل جسم المريض من التقنيات المستخدمة لعلاج بعض أنواع السرطانات سواء على انفراد أو بالترافق مع تقنيات علاج أخرى كالاستئصال الجراحي أو العلاج الكيميائي.

وفضلا عن العلاج بالنظائر المشعة داخل جسم المريض تستخدم حزم الإشعاعات المؤينة من مصادر مشعة عالية النشاط الإشعاعي تصدر إشعاعات جاما كالكوبلت–60 أو السيزيوم–137، أو من حزم الجسيمات الخفيفة كالإلكترونات أو الأشعة السينية من المعجلات

الإلكترونية ذات الطاقات العالية (من 6 حتى 20 م.إ.ف) كالمعجلات الخطية، أو من حزم الأيونات الثقيلة كالبروتونات وغيرها من معجلات السيكلوترون أو التاندم ، أو من حزم النيوترونات أو البوزترونات، وذلك لرجم الأورام السرطانية الجامدة والعميقة داخل الجسم البشري. وعموما، فقد نجحت تقنيات الرجم بالحزم الإشعاعية في علاج العديد من السرطانات الجامدة أو في وقف نموها في كثير من الحالات عند الاختيار الصحيح لحزمة الأشعة ولطاقة الحزمة حتى يمكن تدمير الخلايا السرطانية دون الإضرار كثيرا بالخلايا السليمة المحيطة بالورم السرطاني. وتوجد الآن في العالم عشرات بل مئات مراكز علاج السرطان، Oncology centers التي تضم فرقا من الفيزيائيين المسؤولين عن تخطيط العلاج وعن إيداع الجرعات الصحيحة في المواضع الصحيحة من الجسم حتى لا يفشل العلاج.

9-8 استخدام الإشعاعات المؤينة في التعقيم الطبي

في الوقت الحاضر تعتبر الإشعاعات المؤينة أهم الوسائل الرئيسة لتعقيم المعدات الطبية والأدوات مثل المحاقن والصيدلانيات والأدوية والدم وغيرها. ويعود السبب في ذلك للآتي:

أ- قلة التكلفة بالنسبة لطرق التعقيم الأخرى كالبخار أو الحرارة.

ب- تغليف الأدوات أو المواد المطلوب تعقيمها داخل غلاف غير منفذ للهواء أو البكتريا أو الفيروسات ثم تعرض المادة الخاضعة للتعقيم داخل غلافها لإشعاعات جاما أو الأشعة السينية فتقتل جميع البكتريا والفيروسات عند جرعات إشعاعية محددة ويبقى التعقيم فعالا طالما بقيت المادة داخل الغلاف غير المنفذ.

ج- لا يؤدي التعقيم بالإشعاعات المؤينة إلى رفع درجة حرارة المادة الخاضعة للتحكيم. لذلك فإنه يستخدم لتعقيم جميع المواد

الحساسة للبخار أو الحرارة، ويعتبر التعقيم بالإشعاع هو الطريقة الوحيدة المتاحة والمثلى لتعقيم هذه المواد. ويتم الآن تعقيم الأدوية والصيدلانيات بالإشعاع دون حدوث أي تلف لها. كذلك أصبحت عملية تعقيم الدم بالإشعاع قبل نقله للمريض عملية ضرورية تتم في جميع المستشفيات الراقية بل وإلزامية في بعض الدول لقتل الفيروسات والبكتريا المسببة لعدد من الأمراض الخطيرة كالالتهاب الكبدي الوبائي أو الإيدز أو غيرهما.

د- بساطة طرق التعقيم بالإشعاع وعدم الحاجة لتجهيزات معقدة والعامل الوحيد المؤثر هو جرعة التعرض الإشعاعي أي زمن التعرض لحزمة الإشعاعات.

وعموما، تتم عمليات التعقيم باستخدام حزمة شديدة الكثافة من إشعاعات جاما من مصدر كوبلت-60 أو من الأشعة السينية من معجل إلكتروني خطي وتعريض المادة الخاضعة للتعقيم داخل صناديقها لهذه الحزمة، حيث تخترق أشعة جاما الصناديق بيسر وتمنح جرعة من الطاقة للمادة تكفي لعملية التعقيم.

9-9 استخدامات طبية أخرى للنظائر المشعة والإشعاع

هناك العديد من الاستخدامات الأخرى للنظائر المشعة المختلفة وحزم الإشعاعات المؤينة في المجال الطبي لا يتسع هذا الكتاب لتناولها بإسهاب. ومن هذه الاستخدامات الرائدة إنتاج العديد من اللقاحات الطبية المضادة للبكتريا الفتاكة للبشر وللحيوانات. ويتلخص تأثير الإشعاعات المؤينة في أنه عند تعريض اللقاح في طور معين من أطواره لحزمة من الإشعاعات المؤينة ينخفض زمن المرحلة الطفيلية لهذا اللقاح دون تخفيض قدرته على توليد المناعة عند الكائن المريض. كذلك، يتم في الوقت الحالي استخدام الإشعاع لتعقيم ذكور بعض الحشرات وإطلاقها

لتنافس الذكور السليمة مما يؤدي إلى تناقص سريع في عدد الحشرات في الأجيال اللاحقة، وبالتالي إلى مقاومة العديد من الحشرات الناقلة للأمراض المعدية والخطرة في العالم. ومن التطبيقات المتعددة الأخرى للنظائر المشعة إنتاج البطاريات الكهربائية التي يمكن أن تعمل لعشرات السنوات دون توقف أو إمداد بمصادر طاقة مثل البطاريات المستخدمة في محطات الأرصاد في الأماكن النائية التي يستخدم فيه نظير الاسترونشيوم-90 أو البطاريات النووية لسفن الفضاء أوالبطاريات الخاصة بأجهزة تنظيم ضربات القلب أو غيرها

9-10 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- ماهي مبررات ترشيح حزمة الأشعة السينية ؟.

2- عند استخدام القصدير مع الألومنيوم لترشيح حزمة الأشعة السينية تظهر على الطيف بعض القمم محددة الطاقة من الأشعة السينية. ما سبب ظهور هذه القمم. وكيف يمكن التخلص منها؟.

3- كيف يرتب وضع المرشحات من حيث عددها الذري؟، ولماذا؟.

4- لماذا لاتستخدم مرسحات للحزم الإشعاعية الصادرة من مصادر الكوبلت-60 أو السيزيوم- 137؟.

5- كيف يتغير السمك النصفي لحزمة الأشعة السينية بزيادة طاقة هذه الأشعة؟.

6- أذكر مزايا وعيوب مستقبلات الصورة بأنواعها الثلاثة في عمليات التشخيص بالأشعة السينية.

7- ماهو المقصود بمصطلح الطب النووي؟.

8- اذكر نويدتان من النويدات الأكثر استخداما في مجال الطب النووي واشرح بالتفصيل كيفية انتاج النويدة الأم لكل منهما، مع كتابة معادلة التفاعل لكل منهما.

9- اشرح بالتفصيل كيف يتم استحلاب التكنيشيوم 99 م من مولد المولبدنوم.

10- بفرض أنه يتم استحلاب مولد التكنيشيوم مرة كل 24 ساعة وفي نفس الموعد، ماهي نسبة النشاط الإشعاعي للاستحلاب الثاني مقارنة بالأول؟.

11- ارسم مخططا للمصورة الجامية يبين مكوناتها الرئيسة واذكر وظيفة كل مكون منها.

12- عرف كل من حساسية المصورة الجامية وقدرتها التحليلية، وكيف ترتبطان هاتين الخاصيتين ببعضهما البعض؟.

13- اشرح تقنية طومغرافيا الانبعاث البوزتروني، وما هي النظائر المشعة المستخدمة فيها؟. وكيف يتم الحصول عليها؟.

14- اشرح بالتفصيل خطوات تعيين معدل امتصاص اليود في الغدد الدرقية، واذكر مكونات الجهاز المستخدم ووظيفة كل مكون.

15- اشرح بالتفصيل خطوات قياس حجم بلازما الدم لشخص، وعلل أسباب تساوي حجمي العينتين، واذكر أهمية تخفيف العينة المعيارية، وما هو دور القلعة المستخدمة حول المطياف؟.

16- في دراسة لامتصاص اليود 131 في الغدد الدرقية كانت القراءات كالمبينة في الجدول التالي، فإذا كانت كمية اليود-131 المعطاة للمريض 20 ملليكوري، والكمية في العينة المعيارية بنفس النشاط الإشعاعي. عين نسبة امتصاص الغدد الدرقية لهذا المريض من اليود-131 والقيمة المطلقة الممتصة.

N	N_b	S	S_b
2700	205	12500	200

17- في دراسة لقياس حجم البلازما حقن المريض باليود-131 بنشاط إشعاعي مقداره 10 ميكروكوري وخففت العينة المعيارية ألفي مرة بحيث أصبح حجمها 2000 ملليلتر، وبعد الفترة اللازمة تم سحب 10 ملليلتر من دم المريض وتم فصل البلازما وأخذت عينتان متساويتا الحجم من العينة المعيارية المخففة ومن البلازما مقدارهما 3 ملليلتر وعدت العينتان على المطياف فكانت معدلات العد كالآتي: 3280 نبضة/دقيقة للعينة المعيارية، 2325 نبضة/دقيقة لعينةالبلازما، 160 نبضة/ دقيقة للخلفية الإشعاعية. احسب حجم البلازما لهذا المريض.

18- من جدول (9-3) يتبين أن فوتونات جاما (3) تصدر عن التكنيشيوم 99م بطاقة 142.6 ك.إ.ف، وبنسبة f تساوي0.0003 لكل اضمحلال، عيّن ثابت جرعة التوازن Δ لهذا الخط وعبر عنه بوحدة جرام راد لكل ميكروكوري ساعة.

19- احسب الجرعة المتوسطة الناتجة في كل من الكبد والمبيض الناتجة عن حقن 600 ميغابكرل من التكنيشيوم 99م في مريض إذا كان النظير محقونا في صورة مركب يتركز بالكامل في الكبد تركزاً متجانساً، وباعتبار أن العمر البيولوجي النصفي أكثر بكثير من العمر النصفي الفيزيائي الذي يبلغ 6.02 ساعة.

الفصل العاشر

الأخطار الإشعاعية الخارجية
External radiation hazards

– الإشعاعات الطبيعية في البيئة ومصـــادرها – جرعات المصادر الصناعية – حســـاب معـــدل الجرعة لمصادر جسيمات بيتا – حساب معـــدل الجرعة لإشـــاعات جامـــا – دروع الجســـيمات والإشعاعات وحســـاباتها– مصـــادر الأخطـــار الخارجية والوقاية منها – أسئلة ومسائل مراجعة.

10–1 مصادر الإشعاعات الطبيعية في البيئة
The natural sources of radiation and their sources

يتعرض الإنسان، منذ نشأته، إلى جرعة إشعاعية معينة صادرة من البيئة التي يعيش فيها ومن الغذاء الذي يتناوله، والهواء الذي يتنفسه. وتعرف هذه الجرعات بالجرعات الإشعاعية البيئية الطبيعية. ولا تشكل هذه الجرعات الطبيعية خطورة ملحوظة حيث أن كمياتها تكون عادة ضمن حدود غير عالية، ويعيش الإنسان فيها منذ بدء الخليقة. وتعتبر كل من الأشعة الكونية والإشعاعات المحلية الصادرة عن التربة، وكذلك المواد المشعة الموجودة ضمن تكوين أجسام الكائنات الحية من أهم مصادر الجرعات الإشعاعية الطبيعية.

10–1–1 الأشعة الكونية (The cosmic rays)

تصل كميات كبيرة من الأشعة الكونية المؤينة إلى الغلاف الجوي المحيط بالأرض قادمة من الفضاء الخارجي ومن الشمس. وتحتوي هذه الأشعة على أنواع مختلفة من الجسيمات النووية بطاقات عالية كالبروتونات والنيوترونات وغيرها، وتعرف باسم الأشعة الكونية الأولية (The primary cosmic rays). وعند دخول هذه الجسيمات إلى الغلاف الجوي للأرض فإنها تتفاعل مع المواد التي يتكون منها هذا

الغلاف، فتتغير بذلك مكوناتها وتضعف كمياتها التي تصل إلى سطح الأرض. وتعتمد الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان من الأشعة الكونية على عدة عوامل هي خط العرض بالنسبة للكرة الأرضية، والارتفاع عن سطح البحر، فضلا عن النشاط الشمسي والضغط الجوي.

فالمركبة المشحونة من الأشعة الكونية (كالبروتونات) تتأثر عند اقترابها من سطح الأرض بالمجال المغناطيسي للأرض الذي يحرفها بعيدا عن خط الاستواء في اتجاه القطبين، مما يؤدي إلى زيادة كثافتها كلما اقتربنا من القطبين بالمقارنة بخط الاستواء عند نفس الارتفاع عن سطح البحر. أما النيوترونات فإنها لا تتأثر بالمجال المغناطيسي، ولذلك تتساوى الجرعات الناتجة عن النيوترونات عند خطوط العرض المختلفة.

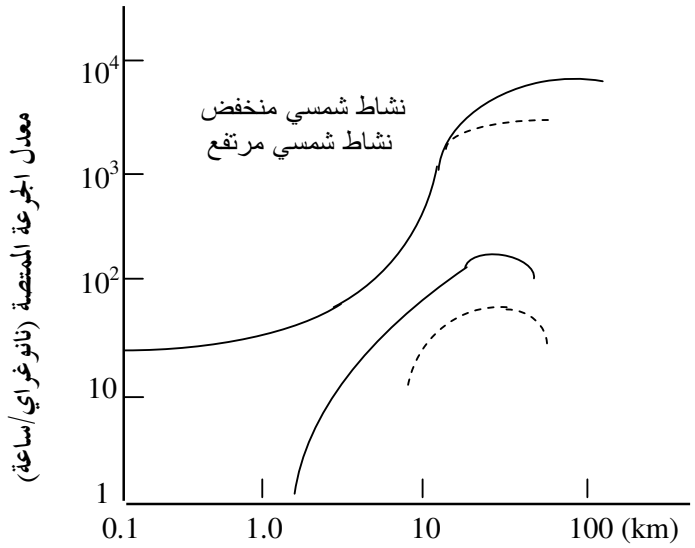
ويلعب الارتفاع عن سطح البحر دورا هائلا في تغيير مقدار الجرعة الناتجة عن الأشعة الكونية. ويختلف الدور باختلاف نوع هذه الأشعة.

فبالنسبة للنيوترونات تكون الجرعة الناتجة عنها عند سطح البحر في حدود 30 ميكروسيفرت في السنة، وهي جرعة محدودة. إلا أن دور النيوترونات يتنامى بشكل سريع بدءا من ارتفاع يبلغ 1 كم فوق سطح البحر. أما بالنسبة للمركبة المؤينة تأيينا مباشرا كالبروتونات فإنها تلعب دورا ملحوظا بدءا من مستوى سطح البحر، حيث تبلغ الجرعة الفعالة الناتجة عنها، عند سطح البحر وعند خط الاستواء، حوالي 240 ميكروسيفرت في السنة. وتزداد هذه الجرعة زيادة بطيئة بزيادة الارتفاع، ثم تتزايد بسرعة كبيرة مع الارتفاع بدءا من 1 كم. ويبين شكل (10–1) كيفية تغير كل من هاتين المركبتين كدالة من الارتفاع عن سطح البحر عند خط عرض 50 درجة شمالا أو جنوبا.

كذلك، يبين جدول (10–1) قيم الجرعات الفعالة السنوية الناتجة عن مركبتي الأشعة الكونية في بعض المدن في العالم مع بيان المتوسط

العالمي للجرعة السنوية الفردية من الأشعة الكونية، وفقا لبيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة في تقاريرها لعامي 1988م، 1993 م.

وتجدر الإشارة إلى أن المتوسط العالمي للجرعة الفعالة السنوية الناتجة عن الأشعة الكونية قد تم تقديره على أساس الأعداد السكانية عند الارتفاعات وخطوط العرض المختلفة. بمعنى آخر، فإن القيم الواردة في الجدول للمتوسط العالمي تعتبر قيما موزونة بالنسبة لأعداد السكان عند الارتفاعات وخطوط العرض المختلفة. كذلك، أخذ دور تأثير المساكن على قيمة الجرعة الفردية من الأشعة حيث يعتبر أن الإنسان يقضي في المتوسط 80 % من الوقت داخل مساكن تحقق بعض الوقاية من تأثير الأشعة الكونية.



شكل(10-1)
كيفية تغير مركبات الأشعة الكونية كدالة من الارتفاع
عند خط عرض 50 درجة

جدول (10–1)
الجرعات الناتجة عن الأشعة الكونية في بعض مدن العالم
والمتوسط العالمي للجرعة السنوية الفردية

المكان	الارتفاع (بالمتر)	الجرعة الفعالة السنوية(ميكروسيفرت)		
		مركبة مؤينة	نيترونات	المجموع
مستوى سطح البحر	صفر	240	30	270
طهران	1180	330	110	440
دنفر(الولايات المتحدة)	1610	400	170	570
مدينة المكسيك	2240	530	290	820
كويتو(اكوادور)	2840	690	440	1130
لاسا(الصين	3600	970	740	1710
لاباز(بوليفيا)	2900	1120	900	2020
المتوسط العالمي		300	80	380

ويتضح من هذا الجدول ومن الشكل(10–1) أن الجرعة الإشعاعية الناتجة عن الأشعة الكونية تكاد تتضاعف عند ارتفاع يبلغ حوالي 1.5كم من سطح البحر. كما يتضح دور الغلاف الجوي المحيط بالأرض كحاجز واق من الأشعة الكونية. وعند حساب الخصائص الوقائية للغلاف الجوي يتضح أنه يكافئ حاجزا مائيا سمكه حوالي 10.3 أمتار.

وبالإضافة إلى التأثير المباشر للأشعة الكونية على الكائنات الحية فإنها تؤدي إلى إنتاج بعض المواد المشعة في الغلاف الجوي نتيجة تفاعلها مع مكونات هذا الغلاف. فمثلا يتكون الكربون 14 المشع في الجو نتيجة تفاعل نيوترونات الأشعة الكونية مع النيتروجين 14، الذي يمثل المكون الرئيس للغلاف الجوي، وذلك طبقا للتفاعل التالي:

$$^{14}N + n \longrightarrow {}^{14}C + p$$

وينتشر الكربون 14 في الغلاف الجوي حتى يصل إلى سطح الأرض فيدخل في تركيب جميع الكائنات الحية الموجودة على الأرض بنسبة ثابتة. كذلك، تتكون بعض النظائر الأخرى كالكالسيوم41 (عمره النصفي 1.1×10^5 سنة) والكلور 36 (عمره النصفي 3.08×10^5 سنة) وغيرها.

10-1-2 الإشعاعات الصادرة من التربة

The terrestrial radiation

تحتوي القشرة الأرضية على كميات ضئيلة من النويدات المشعة طويلة العمر مثل اليورانيوم 338 ، واليورانيوم235، والثوريوم 232 ، ونويداتهم الوليدة (راجع الباب الثاني). كما تحتوي هذه القشرة على كميات قليلة من نظير البوتاسيوم 40 المشع الذي يبلغ عمره النصفي 1.28×10^9 سنة، والروبيديوم 87 ، الذي يبلغ عمره النصفي حوالي 4.7×10^5 سنة. وتتفكك هذه النويدات مصدرة جسيمات ألفا أو بيتا، وقد يتبع ذلك إصدار إشعاعات جاما. ولا تمثل جسيمات ألفا أية مخاطر إشعاعية على البشر الذين يعيشون فوق الأرض نظرا لقصر مداها. كذلك، لا تمثل جسيمات بيتا مخاطر ملموسة. أما بالنسبة لإشعاعات جاما ذات القدرة الاختراقية العالية فإنها تمثل الإسهام الرئيس في الجرعة الإشعاعية الصادرة عن التربة.

ويعتمد مقدار الجرعة السنوية الناتجة عن إشعاعات جاما على نوع التربة وعلى نسبة تركيز النويدات المشعة فيها. وتتفاوت تراكيز النويدات المشعة تفاوتا كبيرا تبعا لنوع التربة حيث يزداد تركيز اليورانيوم، على سبيل المثال، في الصخور الجرانيتية أو التربة الطفلية. ويبين جدول (10-2) قيم معدلات الجرعة الفعالة السنوية التي يتعرض لها البشر في بعض الأماكن من إشعاعات جاما الصادرة عن التربة، وكذلك قيمة المتوسط الموزون عالميا لهذا المعدل، وفقا لبيانات اللجنة العلمية للأمم المتحدة.

كذلك، اتضح من جميع القياسات التي تمت داخل المساكن وخارجها أن معدلات الجرعة الفعالة داخل المساكن تبدو، عموما، أعلى منها خارجها بحوالي 40 – 45 % في المتوسط. ويعود السبب في ذلك إلى مواد البناء المستخدمة في بنـــاء المساكن التي تحتوي على تراكـــيز

جدول (10–2)
قيم معدلات الجرعة الفعالة السنوية من إشعاعات جاما الأرضية في بعض الأماكن والمتوسط العالمي للمعدل

المكان	معدل الجرعة السنوية بالميللي سيفرت
كندا	0.23
الصين	0.55
الدنمارك	0.36
هونج كونج	1.32
اليابان	0.32
السويد	0.65
المملكة المتحدة	0.35
الولايات المتحدة الأمريكية	0.28
المتوسط العالمي	0.46

متفاوتة من المواد المشعة الطبيعية مثل نويدات سلاسل اليورانيوم238 والأكتينيوم، والثوريوم 232، وكذلك نويدات البوتاسيوم 40.

10–1–3 المواد المشعة الموجودة داخل جسم الكائن الحي

يحتوي جسم الكائن الحي على كميات ضئيلة من النظائر المشعة كالكربون 14 والبوتاسيوم 40 (عمره النصفي 1.28×10^{9} سنة). فالبوتاسيوم 40 موجود في الطبيعة مع البوتاسيوم 39 المستقر بنسبة 11.7 : 100000. وحيث إن كتلة جسم الإنسان المعياري البالغ تبلغ 70 كغم تحتوي على حوالي 140 غراما من البوتاسيوم 39 فإن هذه الكتلة الأخيرة تحتوي على 0.16 جرام من البوتاسيوم 40 المشع. وتصدر هذه الكمية من البوتاسيوم المشع حوالي 4200 تفككا في الثانية

الواحدة. منها 89 % في شكل جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 1.461 م.إ.ف. وتمتص طاقة جسيمات بيتا بالكامل داخل الجسم البشري كما تمتص 50 % من طاقة إشعاعات جاما داخله. وتؤدي هذه الإشعاعات إلى جرعة مكافئة سنوية مقدارها 0.2 ميللي سيفرت . ويبين جدول (10–3) أهم المواد المشعة الموجودة داخل جسم الإنسان ومقدار الجرعة المكافئة السنوية الناتجة عن كل منها.

جدول (10–3)
المواد المشعة الموجودة طبيعيا داخل
الجسم البشري والجرعات الناتجة عنها

اسم النظير	عدد التفككات في الجسم البالغ (في الثانية)	الجرعة المكافئة السنوية بالميللي رم
بوتاسيوم 40	4200	20
كربون14	3210	1
راديوم 226	5–4	5–0.5
بولونيوم 210	8	1.4–0.1 في العظام
سترونشيوم 90	300–25	17 – 0.4 في العظام
		4.5–0.4 في النخاع
المجموع		49–23.5

10–1–4 غاز الرادون The radon

يعتبر غاز الرادون هو المساهم الأكبر في تعرض الإنسان لمصادر الإشعاع الطبيعية. ويوجد في الطبيعة للرادون ثلاثة نظائر مشعة هي الرادون 222 وينتج عن سلسلة اليورانيوم 238 بعد تفكك الراديوم 226، والرادون 220 الذي ينتج عن تفكك سلسلة الثوريوم بعد تفكك الراديوم 224، ثم الرادون 219 الذي ينتج عن تفكك سلسلة اليورانيوم 235 بعد تفكك الراديوم 223 .

ولا يمثل الرادون 219 مخاطر بشرية محسوسة نظرا لقلة نسبة اليورانيوم 235 في الطبيعة، وانخفاض العمر النصفي للرادون 219.

ويمثل الرادون 220 مخاطر محدودة تزيد في المناطق الغنية بالثوريوم 232. أما نظير الرادون 222 فيمثل أكبر المخاطر على الإطلاق نظرا لأنه يتميز بعمر نصفي طويل نسبيا (3.82 يوم).

ويزيد تركيز غاز الرادون داخل المباني بالمقارنة بتركيزه في الهواء الطلق. ويعتمد تركيز الرادون داخل المباني على نوع التربة ونوع الجداران وأسلوب التهوية. ففي المباني المفتوحة ذات التهوية المستمرة يكون تركيز الرادون داخل المبنى مقاربا لتركيزه في الهواء الطلق. أما في الأماكن المغلقة التي لا يتجدد هواؤها باستمرار بغية ترشيد استهلاك الطاقة في عمليات التكييف فيمكن أن يصل فيها تركيز الرادون لمستويات خطيرة. كذلك، تعتبر بعض مصادر المياه الجوفية مصدرا للرادون حيث يكون الرادون ذائبا في هذه المياه وينبثق عنها عند استخدام المياه خاصة في الحمامات. كما تتميز بعض مصادر الغاز الطبيعي المستخدم في المنازل بوجود تراكيز عالية من غاز الرادون تتصاعد إلى الجو عند احترق ذلك الغاز. ويمكن أن يصل تركيز الرادون في بعض الأماكن المغلقة إلى قيم تزيد على 100000 بكرل/ متر مكعب من الهواء، في حين أن تركيزه في الهواء الطلق يتراوح بين عدد قليل من البكرل وعدد قليل من عشرات البكرل في المتر المكعب (5– 50 بكرل/ م^3).

ويدخل الرادون جسم الإنسان مع هواء التنفس ويمكن أن ينتقل إلى الدم أو يؤثر مباشرة على الرئتين. وتتمثل مخاطر الرادون في أنه مصدر لجسيمات ألفا فضلا عن النويدات الوليدة المشعة التي تنتج عن تفككه. ويبين جدول (10–4) قيم تراكيز الرادون المتوسطة والموزونة عالميا طبقا لكثافة السكان وأنماط التهوية، وكذلك تركيز النويدات الوليدة المتوازنة مع الرادون مثل البولونيوم 214 والبولونيوم 210 وغيرها، حيث تشكل هذه النويدات الإسهام الأكبر في المخاطر على الإنسان.

من هذا يتضح أن غاز الرادون يشكل الإسهام الأكبر في الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الإنسان من المصادر المشعة الطبيعية،

حيث تمثل جرعة التعرض للرادون بمفردها حوالي 50% من إجمالي الجرعة التي يتعرض الإنسان لها سنويا من جميع المصادر الطبيعية.

وهكذا، يتعرض الإنسان لجرعة طبيعية من الإشعاعات ناتجة عن البيئة التي يعيش فيها. وتختلف هذه الجرعة باختلاف خط عرض المكان وارتفاعه عن سطح البحر وطبيعة التربة ونوع المسكن وعدة عوامل أخرى كثيرة. ويبين جدول (10–5) الجرعات المكافئة الناتجة عن المصادر الطبيعية:

جدول (10–4): متوسطات تركيز غاز الرادون ونويداته الوليدة المتوازنة والجرعات الفعالة الناتجة عن هذه التراكيز

النويدة	الموقع	التركيز (بكرل/م^3)		الجرعة الفعالة السنوية (ميكروسيفرت)	
		غاز	نويدات متوازنة	غاز	نويدات متوازنة
رادون 222	خارج المباني	10	8	3	130
	داخل المباني	40	16	48	1000
متوسط الجرعة الفعالة السنوية (ميكروسيفرت) حوالي 1200					
رادون 220	خارج المباني	10	0.1	1.9	1.8
	داخل المباني	3	0.3	2.3	67
متوسط الجرعة الفعالة السنوية (ميكروسيفرت) حوال : 73					

وهكذا، يتضح أن غاز الرادون يشكل الإسهام الأكبر في الجرعة الفعالة التي يتعرض لها الإنسان من المصادر الإشعاعية الطبيعية حيث تمثل جرعة التعرض للرادون بمفردها في المتوسط 1.2 ميللي سيفرت/سنة، وهو ما يمثل حوالي 50% من إجمالي الجرعة التي يتعرض الإنسان لها سنويا من جميع المصادر الطبيعية.

وهكذا، يتعرض الإنسان لجرعة طبيعية من الإشعاعات ناتجة عن البيئة التي يعيش فيها. وتختلف هذه الجرعة باختلاف المكان وارتفاعه عن سطح البحر وطبيعة التربة ونوع المسكن وعدة عوامل أخرى كثيرة. ويبين جدول (10–5) الجرعات المكافئة الناتجة عن

المصادر الطبيعية طبقا لأحدث البيانات التي توصلت إليها اللجنة العلمية للأمم المتحدة المعنية بتأثيرات الإشعاعات المؤينة.

جدول (10–5): قيم الجرعات المتوسطة
من المصادر الطبيعية للإشعاعات المؤينة

مصدر التعرض	قيمة الجرعة الفعالة السنوية المتوسطة(ميللي سيفرت)	
	في المناطق العادية	في المناطق عالية الإشعاع
– الأشعة الكونية	0.38	2.00
– نويدات كونية في الهواء	0.01	0.01
– تعرض خارجي للإشعاعات الصادرة من التربة	0.46	4.30
– تعرض داخلي (بخلاف الرادون)	0.23	0.60
– رادون 222 ونواتجه	1.20	10.00
– رادون220 ونواتجه	0.07	0.10
– إجمالي الجرعة السنوية المتوسطة من المصادر الطبيعية	2.40	تعتمد كثيرا على المكان والارتفاع

10–2 المصادر الإشعاعية الاصطناعية

منذ عشرات السنين ظهرت عدة مصادر إشعاعية مصنعة، ساهمت في الجرعة الفعالة الجماعية لعموم البشر. وأهم هذه المصادر ما يلي:

10–2–1 الأشعة التشخيصية The diagnostic radiology

يتعرض الإنسان لجرعات إشعاعية معينة عند عمل صور تشخيصية بالأشعة السينية أو النووية مهما قل زمن التعرض. وتختلف

قيمة الجرعة باختلاف العضو ونوع الصورة المطلوبة ونوع جهاز الأشعة والفيلم الحساس المستخدم للتصوير وغيرها. وتؤكد اللجنة العلمية للأمم المتحدة، في تقاريرها الدورية، أن الأشعة التشخيصية هي المساهم الأعظم في الجرعة الفعالة الجماعية التي تتكبدها البشرية في العالم من المصادر التي صنعها البشر (man- made sources). وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة الجرعة الفعالة الجماعية السنوية لسكان العالم بما يتراوح بين 3–5 ملايين فرد سيفرت. وباستخدام معامل المخاطر الوارد في الفصول السابقة يتبين أن الأشعة السينية التشخيصية مسؤولة عن إحداث ما بين 30 حتى 50 ألف إصابة سرطانية قاتلة على مستوى العالم سنويا. ويبين جدول (10–6) مقادير الجرعات الفعالة التي يتكبدها الفرد في الفحص الواحد (أي اللقطة الواحدة) بالأشعة السينية في بعض دول العالم التي تتوفر فيها أنظمة لمراقبة التعرض الإشعاعي من الفحوص التشخيصية.

جدول (10–6): متوسط الجرعة الفعالة عن اللقطة الواحدة للفحص بالأشعة السينية لبعض الأعضاء في بعض الدول

نوع الفحص	الدولة				
	فرنسا	إيطاليا	روسيا	الولايات المتحدة	الصين
الجمجمة	1.4	0.22	0.17	0.13	–
العمود الفقري	1.4	0.14	0.23	0.20	–
الصدر	0.28	0.18	0.36	0.07	0.21
البطن	2.6	1.9	1.50	0.56	4.5
الجهاز البولي	10.4	7.1	2.50	1.60	–
الحوض والفخذ	1.6	3.2	1.50	0.6	–

10–2–2 الأشعة العلاجية Therapeutic radiology

تتوقف قيمة الجرعة المكافئة على العضو الذي يتم علاجه والتعرض المطلوب له ونوع العلاج. وقد تزيد الجرعة الفعالة الناتجة عن العلاج الإشعاعي كثيرا بالمقارنة بجرعة التشخيص. ويوجد الآن في

العالم حوالي 18000 جهاز أشعة أو معجل نووي تستخدم للعلاج الإشعاعي لمرضى السرطان. إلا أنه ينبغي الإشارة إلى أن عدد الأشخاص الذين يخضعون للعلاج بالإشعاع محدود للغاية. وبذلك، تقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن الجرعة الفعالة الجماعية السنوية الناتجة عن العلاج الإشعاعي تبلغ حوالي 1.8 مليون فرد.سيفرت.

10-2-3 الطاقة النووية وصناعاتها

The nuclear Energy and industries

اتسع في السنوات الأخيرة استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء وفي تحريك السفن وحاملات الطائرات والغواصات العملاقة. ويوجد الآن في العالم أكثر من 450 مفاعلا نوويا لتوليد الطاقة الكهربائية موزعة في ثلاثين دولة. وتنشر هذه المنشآت كميات من المواد المشعة في البيئة ضمن ظروف التشغيل الطبيعية أو نتيجة للحوادث النووية. وفضلا عن ذلك، تبث مناجم اليورانيوم ومصانع معالجة الوقود النووي وإعادة معالجته بعد استهلاكه في المفاعلات كميات من المواد المشعة التي ساهمت في زيادة تعرض البشرية للإشعاع المؤين. إلا أنه نتيجة للالتزام الجيد بقواعد الأمان النووي فغن إسهام الصناعة النووية في التعرض الإشعاعي على المستوى العالمي مازال محدودا. فقد أسفر أكبر حادث نووي خلال أكثر من نصف قرن وهو حاث مفاعل تشرنوبل بأكرانيا عن جرعة فعالة جماعية تبلغ 600000 فرد. سيفرت، وهذه الأخيرة لا تتجاوز جزءا من سبعة أجزاء مما يتعرض له العالم من الفحوص التشخيصية سنويا.

10-2-4 النفايات المشعة The radioactive waste

هي تلك النفايات المتخلفة عن المفاعلات النووية أو المتبقية بعد استخدام المواد المشعة وتدخل الجرعة الفعالة الجماعية الناجمة عنها ضمن الجرعة الفعالة الجماعية للصناعات والطاقة النووية.

10-2-5 الغبار الذري The radioactive dust

خلال النصف الثاني من القرن الماضي (العشرين) نفذت عشرات بل مئات التفجيرات النووية في الجو خاصة في الفترة مابين عامي 1954م، 1962، وذلك قبل توقيع الاتفاقية الجزئية لحظر تجارب هذه التفجيرات في الجو عام 1963. ونتيجة لهذه التجارب تساقطت على سطح الأرض، خاصة في نصف الكرة الشمالي، كميات كبيرة من الغبار الذري الذي يتضمن مخلفات التفجيرات ونواتج الانشطار المشعة طويلة العمر. ومن أخطر هذه النواتج الكربون 14 والسيزيوم 137 والاسترونشيوم 90. ويصل إجمالي الجرعة الفعالة الجماعية من التفجيرات النووية التي تمت حتى الآن 30 مليون فرد.سيفرت، وصل للبشرية منها حتى الآن حوالي 15 %، وسوف يصل الباقي خلال مئات السنين القادمة.

ويبين جدول (10–7) الجرعات الفعالة السنوية للفرد الواحد، كمتوسط حسابي لجميع البشر على الأرض (حوالي 6 مليار نسمة)، الناتجة عن المصادر الاصطناعية المذكورة.

جدول (10–7): متوسط الجرعة الفعالة السنوية
للفرد عن بعض المصادر الاصطناعية

المصدر	متوسط الجرعة المكافئة السنوي (ميللي سيفرت)
الأشعة التشخيصية	0.70
أشعة العلاج	0.30
استخدام النظائر المشعة في الطب	0.02
النفايات المشعة	0.02
تساقط الغبار الذري	0.07
السكن بالقرب من محطة نووية	0.05
مصادر أخرى	0.04

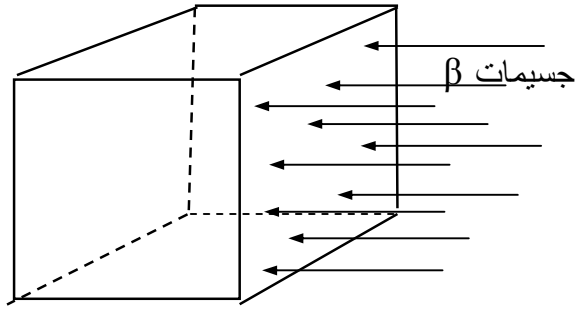
10–3 حساب معدل جرعة التعرض الخارجي من مصادر مشعة

10-3-1 حساب الجرعة لمصادر جسيمات بيتا

نفرض أن لدينا مصدرا رقيقا لجسيمات بيتا، حتى يمكن إهمال الامتصاص الذاتي داخل المصدر. ونفرض أن كثافة تدفق جسيمات بيتا (أو معدل سيولة هذه الجسيمات) في النقطة المطلوب تحديد معدل الجرعة عندها هي ϕ (جسيم /سم^2.ثانية)، وأن طاقة هذه الجسيمات هي E ميجا إلكترون فولت. عندئذ يكون تدفق الطاقة (أو معدل سيولة الطاقة) هو: $E\ \phi$.

فلو تصورنا مكعبا من الماء أو من نسيج مكافئ طول ضلعه 1 سم لكان تدفق الطاقة خلال وجه المكعب (شكل 10–2) هو:

$$E \phi \times (1\ cm^2) = \phi E$$



شكل (9–2)
تدفق الطاقة خلال مكعب من الماء طول ضلعه 1 سم

فإذا كانت طاقة جسيمات بيتا في حدود عدة ميجا إلكترون فولت يكون مدى هذه الجسيمات في النسيج في حدود 1 سم، أي أن الجسيمات تفقد كل طاقتها داخل هذا المكعب. وبذلك، يكون معدل انتقال الطاقة من جسيمات بيتا إلى حجم من النسيج مقداره 1 سم^3 هو ϕE ميغا إلكترون فولت/ سم^2.ثانية.

وحيث أن كثافة الماء هي 1 غم/ سم^3 ،يكون معدل انتقال الطاقة من الجسيمات للمكعب هو $\Phi\phi E$ م.إ.ف/غم.ثانية.

وحيث أن 1 ميللي راد = 6.25×10^4 م.إ.ف/غم (راجع الفصل السابع)، يكون معدل الجرعة الممتصة بالميللي راد/ ثانية هو:

$$D^* = \phi E \ (MeV/\ gm.sec) \div 6.25 \times 10^4 \ (MeV/\ gm.\ mrad)$$
$$= 1.6 \times 10^{-5} \phi E \quad mrad/\ sec$$

وبالانتقال من الثانية إلى الساعة يكون المعدل D^* هو:

$$D^* = 1.6 \times 10^{-5} \ \phi E \ \times \ 3600$$
$$= 0.0576 \ \phi E \quad mrad/\ hour$$

وحيث إن العامل المرجح لجسيمات بيتا هو ($W_R = 1$)، فإنه يمكن تحديد معدل الجرعة المكافئة D^* كالآتي:

$$H^* = 0.0576 \times \phi E \times 1$$
$$= 0.0576 \times \phi E \quad mrem/hour$$

أي أن:

$$H^* = 0.576 \ \phi E \quad \mu Sv/\ hour \qquad (10\text{-}1)$$

وتجدر الإشارة إلى أن مصادر جسيمات بيتا تصدر جسيماتها بطاقات مستمرة تبدأ من الصفر وتنتهي عند القيمة القصوى. لذلك، فإنه يجب استخدام القيمة المتوسطة لطاقة هذه الجسيمات. وتختلف هذه القيمة المتوسطة من مصدر لآخر. ويبين جدول (10–8) بعض الخصائص لبعض مصادر جسيمات بيتا الشائعة الاستخدام، حيث تظهر القيمة المتوسطة للطاقة لهذه المصادر.

جدول (10–8): بعض مصادر جسيمات بيتا وأهم خصائصها

الخاصية	كربون 14	كبريت 35	كالسيوم 45	فسفور 32	سترنشيوم 90
العمر النصفي	5730 سنة	87 يوما	165 يوما	14.3يوم	28.1سنة
الطاقة القصوى (م.إ.ف)	0.154	0.167	0.254	1.701	2.24
الطاقة المتوسطة(م.إ.ف)	0.050	0.049	0.077	0.70	0.93
المدى في الهواء (سم)	30	30	60	600	870
المدى في الماء (سم)	0.029	0.032	0.06	0.8	1.1
السمك النصفي في الماء (سم	0.0022	0.002 5	0.0048	0.10	0.14
نسبة امتصاص الطاقة في طبقة الجلد الميت الخارجي	%89	%84	%63	%5	%3

مثال:

احسب معدل الجرعة الممتصة وكذلك المكافئة التي تنتج عن جسيمات بيتا، إذا علمت أن تدفق هذه الجسيمات هو 500 جسيم/سم^2. ثانية وأن طاقتها المتوسطة 0.7 م.إ.ف.

الحل:

يحسب معدل الجرعة الممتصة D^* بدلالة معدل السيولة والطاقة المتوسطة (بالميغا إلكترون فولت) من العلاقة:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E\ (MeV)$$
$$= 0.0576 \times 500 \times 0.7$$
$$= 20.16 \quad mrad/h$$

كما يحسب معدل الجرعة المكافئة من الجرعة الممتصة والعامل المرجح لجسيمات بيتا بالعلاقة:

$$H^* = D^* \times W_R$$
$$= 20.16 \times 1$$
$$= 20.16 \quad mrem/h = 201.6\ \mu Sv/h$$

مثال:

لديك مصدر فسفور 32 رقيق نشطه الإشعاعي 2 ميللي كوري. احسب معدل الجرعة الممتصة تحت طبقة الجلد الميت على مسافة 1م من هذا المصدر (أهمل الامتصاص في الهواء)

الحل:

نحسب أولا كثافة تدفق الجسيمات ϕ (أو معدل السيولة) بدلالة النشاط الإشعاعي للمصدر ومساحة سطح الكرة التي يوجد المصدر في مركزها والتي يبلغ نصف قطرها $R = 1\ m$ كالآتي:

$$\phi = S / 4\pi R^2$$
$$= 2 \times 3.7 \times 10^7 / 4 \times 3.14 \times 100 \times 100$$
$$= 589 \quad particles/cm^2.sec$$

وحيث أن مقدار الجزء الممتص من طاقة جسيمات بيتا في طبقة الجلد الميت هو 5 % يكون مقدار الجزء المتغلغل من الطاقة 95 %

وحيث أن متوسط طاقة جسيمات بيتا لمصدر الفسفور هي 0.7 م.إ.ف، يكون معدل الجرعة الممتصة هو:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E$$
$$= 0.0576 \times 589 \times 0.7 \times 0.95$$
$$= 22.56 \quad \text{mrad}$$

مثال:

احسب معدل الجرعة الممتصة الناتجة عن مصدر بيتا، إذا علمت أنه عند تسجيل جسيمات بيتا بواسطة عداد غايغر ميولر ذو النافذة كان معدل العد هو 40000 جسيم/دقيقة، وأن قطر النافذة هو 3سم، وأنه يمكن اعتبار متوسط طاقة هذه الجسيمات 1 م.إ.ف.

الحل :

نحسب أولا مساحة النافذة A :

$$A = \pi r^2$$
$$= 3.14 \times (1.5)^2 = 7.07 \quad \text{cm}^2$$

وعند إهمال الامتصاص في النافذة يمكن إيجاد كثافة التدفق ϕ عند النافذة كالآتي:

$$\phi = S / A$$
$$= 40000 / 7.07 = 5658 \quad \text{particles/ cm}^2\text{. Minute}$$
$$= 5658 / 60 = 94.3 \quad \text{particles/ cm}^2\text{.sec}$$

وبالتالي يتم حساب معدل الجرعة الممتصة:

$$D^* = 0.0576 \times \phi E$$
$$= 0.0576 \times 94.3 \times 1$$
$$= 5.46 \quad \text{mrad/h}$$

ويجب الإشارة إلى أن معدل الجرعة الممتصة أو المكافئة يضعف كلما زادت المسافة، ليس بسبب قانون التربيع العكسي فحسب، ولكن كذلك نظرا لامتصاص بعض جسيمات بيتا في طبقة الهواء المتزايدة السمك. ونظرا لاعتماد الامتصاص على طاقة الجسيمات فإنه يصعب وضع علاقة بسيطة بين معدل الجرعة والمسافة، ولكن يمكن استخدام العلاقة التقريبية التالية لتحديد معدل الجرعة الممتصة (بالميللي راد/ ساعة)، عندما يعطى النشاط الإشعاعي S للمصدر بالميغا بكرل والمسافة d بالمتر والطاقة بالميغا إلكترون فولت.

$$D^* = 0.5 \; S \; E / d^2 \qquad (10\text{-}2)$$

10-3-2 حساب معدل الجرعة لإشعاعات جاما

إذا كانت كثافة تدفق (أي معدل سيولة) إشعاعات جاما هي ϕ فوتون/سم^2.ثانية، وكانت طاقة هذه الفوتونات ثابتة وتساوي E ، يكون تدفق الطاقة هو $E \; \phi$. وعند اجتياز هذه الطاقة لوحدة المسافات من الوسط المادي ينتقل جزء من الطاقة إلى هذا الوسط. وتعتمد كمية الطاقة المنتقلة للوسط على طاقة إشعاعات جاما الساقطة وعلى نوع هذا الوسط. ولتحديد كمية الطاقة المنتقلة لوحدة الحجم من جسم الإنسان يمكن استخدام البيانات الواردة في جدول (10-9) الذي يبين قيمة السمك النصفي (بالسم) ومعامل الامتصاص الكتلي (بالسم^2/غم) لكل من الأنسجة العضلية والعظام البشرية (لاحظ أن معامل امتصاص الطاقة لأشعة جاما يقل قليلا عن معامل التوهين الذي تعرفنا عليه في الفصل الثالث. اشرح لماذا؟).

فإذا كانت طاقة إشعاعات جاما مساوية 1م.إ.ف، يكون معامل الامتصاص الكتلي (انظر الجدول) في النسيج العضلي هو 0.031 سم^2/جم. وحيث أن النسيج العضلي يكافئ الماء تقريبا وأن كثافة الماء هي 1جم/سم^3 تكون الطاقة المنتقلة لوحدة الحجم من جسم الإنسان هي:

$$\xi = 0.031 \times \phi \, E \; (MeV/ cm^3 . sec)$$

وحيث أن كثافة النسيج البشري هي تقريبا ا جم/سم^3 تكون الطاقة المنتقلة لكل سم^3 من هذا النسيج هي:

جدول (10–9): العلاقة بين طاقة إشعاعات جاما
والسمك النصفي للأنسجة والعظام البشرية

الطاقة	السمك النصفي		معامل الامتصاص الكتلي	
م.إ.ف	نسيج عضلي (سم)	عظام (سم)	نسيج (سم2/جم)	عظام (سم2/جم)
0.01	0.13	0.019	4.87	19.20
0.02	0.95	0.14	0.533	2.46
0.03	2.02	0.41	0.154	0.72
0.04	2.78	0.78	0.070	0.304
0.05	3.19	1.15	0.043	0.161
0.06	3.54	1.45	0.033	0.100
0.08	3.84	1.88	0.026	0.054
0.1	4.09	2.14	0.026	0.039
1.0	9.90	5.58	0.031	0.030
10.0	31.3	16.3	0.016	0.016

$$\xi = 0.031 \times \phi E \ (MeV/\ gm\ .\ sec)$$

وحيث أن 1 ميللي راد = 6.25×10^4 م.إ.ف/جم، يكون معدل الجرعة الممتصة بالميللي راد/ثانية هو:

$$D^* = 0.031 \times \phi E / 6.25 \times 10^4$$

$$= 4.96 \times \phi E \times 10^{-7} \quad mrad/sec$$

$$= 4.96 \times \phi E \times 10^{-7} \times 3600$$

$$D^* = 0.00179\ \phi E \quad mrad/hour \qquad (10\text{-}3)$$

وحيث أن المعامل المرجح لإشعاعات جاما يساوي 1 تحسب الجرعة المكافئة بنفس العلاقة، أي أن:

$$H^* = 0.00179\ \phi E \quad mrem/hour$$

$$= 0.0179\ \phi\ E \qquad \mu Sv/hour \qquad (10\text{-}4)$$

وفي حالة المصادر النقطية يحسب التدفق ϕ من العلاقة المعروفة:

$$\phi = S / 4\pi R^2$$

وبالتعويض عن في العلاقة (4–10) يكون معدل الجرعة المكافئة هو:

$$H^* = 0.0179\ S\ E / 4\pi R^2 \qquad (\mu Sv / hour)$$

فإذا عبرنا عن النشاط الإشعاعي للمصدر S بالميغابكرل، وعن الطاقة E بالميغا إلكترون فولت، وعن المسافة d بين المصدر والنقطة المعنية بالمتر، يكون معدل الجرعة المكافئة بالميكروسيفرت/ساعة هو:

$$H^* = 0.0179 \times 10^6 \times S\ E / 4 \times 3.14 \times 10^4 \times R^2$$

أي أن:

$$H^* = 0.142 \times S\ E / R^2 \qquad (10\text{-}5)$$

ونظرا لاختلاف معامل الامتصاص لأشعة جاما باختلاف كل من طاقة هذه الإشعاعات ونوع النسيج (نسيج عضلي أو عظام)، لذا فإنه يمكن استخدام العلاقة :

$$H^* = S\ E / 6\ d^2 \qquad \mu Sv / h \qquad (10\text{-}6)$$

لإيجاد معدل الجرعة المكافئة بالميكروسيفرت/ساعة. وهذه العلاقة الأخيرة تعطي معدلا يزيد بمقدار 17 % عن العلاقة (5–10) السابقة.

وهاتان العلاقتان الأخيرتان صحيحتان عندما يصدر النظير المشع فوتونات بطاقة واحدة وعندما يكون عدد هذه الفوتونات مساويا للنشاط الإشعاعي للمصدر. إلا أنه من المعلوم أن النظائر المشعة يمكن أن تصدر فوتونات جاما بأكثر من قيمة واحدة للطاقة ويقال إن النظير يصدر عددا من خطوط جاما بطاقة محددة لكل خط. فضلا عن ذلك يتميز كل خط من الخطوط جاما بنسبة محددة من الانبعاث منسوبة للنشاط الإشعاعي للمصدر. ويطلق على هذه النسبة المعامل f لهذا

الخط. والمعامل f للخط المعين هو عبارة عن نسبة عدد فوتونات جاما المنطلقة بالطاقة المحددة للخط لكل 100 تفكك من تفككات النظير للجيل الأول. فعلى سبيل المثال عندما تتفكك 1000 نواة سيزيوم 137 من خلال التفكك البيتاوي إلى الباريوم 137 ينبعث من هذا العدد من نوى الباريوم 852 فوتونا بطاقة 662 ك.إ.ف. لذلك يقال أن القيمة f لهذا الخط هي 0.852 أي85.2 %. كذلك، فإنه عندما يتفكك الكوبلت 60 للنيكل 60 يصدر الأخير خطين من خطوط جاما، بطاقتين هم 1173 ، 1332 ك.إ.ف وبنسب f تساوي 100% للأول، 99.9 % للثاني.

وعندما يؤخذ في الحسبان وجود أكثر من خط من خطوط جاما للنظير المعين بنسب تفرع f مختلفة، تتخذ العلاقة (10-5) الصورة التالية:

$$H^{*} = 0.142 \, (S / R^{2}) \sum_i f \, x \, E_i \qquad (10\text{-}7)$$

10-3-3 معامل جاما النوعي The gamma specific factor

لا يتطلب الأمر عند إيجاد معدل الجرعة بالعلاقة (10-7) معرفة النشاط الإشعاعي للمصدر والبعد عن النقطة المعنية فحسب، وإنما يتطلب كذلك معرفة بعض البيانات النووية عن النظير المصدر لإشعاعات جاما وتحديدا طاقات الخطوط f والنسبة (يطلق عليها في بعض المراجع بالخطأ نسبة التفرع).

لذلك، فإنه قد تم حساب معامل عرف باسم معامل جاما النوعي Γ للنظير المعين. ويعرف هذا المعامل فيزيائيا وفقا للنظام المعياري الدولي للوحدات بأنه معدل الجرعة من مصدر جاما، يبلغ نشاطه الإشعاعي ميغا بكرل واحد في نقطة تبعد متر واحد عن المصدر. كما يعبر عن هذا المعامل رياضيا بالعلاقة:

$$\Gamma \equiv = 0.142 \sum_i f \, x \, E_i \qquad (10\text{-}8)$$

وعندما يتم التعبير عن النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغا بكرل تكون وحدة قياس معامل جاما النوعي في العلاقة السابقة هي

(ميكروسيفرت/ساعة) لكل (ميغابكرل/متر مربع). وبمقارنة العلاقتين السابقتين (10–7)، (10–8) فإنه يتبين سهولة حساب معدل الجرعة المكافئة أو الفعالة، بوحدة ميكرو سيفرت/ساعة، عند معرفة معامل جاما النوعي من العلاقة:

$$H^* = \Gamma \times S / R^2 \qquad (10\text{-}9)$$

ويبين جدول (10–10) معامل جاما النوعي لبعض النظائر المشعة واسعة الاستخدام في المجالات الصناعية والطبية.

جدول (10–10): معامل جاما النوعي لبعض النظائر المشعة

النظير	معامل جاما النوعي	النظير	معامل جاما النوعي
صوديوم 22	0.324	ثاليوم 170	0.034
كوبلت 60	0.356	إيريديوم 192	0.0130
تكنيشيوم 99	0.022	ذهب 198	0.063
يود 131	0.059	راديوم 226	0.224

مثال:

احسب معدل الجرعة المكافئة الناتج على مسافة قدرها 150 سم من مصدر سيزيوم 137 نشاطه الإشعاعي 20 كيوري، إذا علمت أن طاقة إشعاعات جاما للمصدر هي 662 كيلو إلكترون فولت.

الحل:

النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغابكرل هو:

$$S = 20 \times 3.7 \times 10^{10} / 1 \times 10^{6} = 7.4 \times 10^{5} \quad MBq.$$

طاقة إشعاعات جاما بالميغا إلكترون فولت هي:

$$E = 662 / 1000 = 0.662 \quad MeV$$

وباستخدام العلاقة (10–5) يكون معدل الجرعة المكافئة:

$$H^* = 0.142 \times 7.4 \times 10^{5} \times 0.662 / (1.5)^2$$

$$= 30917 \quad \mu Sv/h$$

$\approx$ 31 mSv/h

وباستخدام العلاقة (10–6) يكون المعدل هو:

$H^* = 36287$ µSv/h $\approx$ 36.3 mSv/h

مثال:

احسب معدل الجرعة المكافئة على بعد مترين من مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 1 كيوري، إذا علمت أن كل تفكك لنواة كوبلت 60 يصدر فوتونين أحدهما بطاقة 1.173 والآخر بطاقة1.332 م.إ.ف.

الحل:

النشاط الإشعاعي للمصدر بالميغابكرل هو:

$S = 1 \times 3.7 \times 10^{10} / 1 \times 10^{6} = 3.7 \times 10^{4}$ MBq.

معدل الجرعة المكافئة للطاقة 1.173 هو:

$H^* = 0.142 \times 3.7 \times 10^{4} \times 1.173 / (2)^2$

$= 1541$ µSv/h

معدل الجرعة للطاقة 1.332 م.إ.ف هو:

$H^* = 0.142 \times 3.7 \times 10^{4} \times 1.332 / (2)^2$

$= 1750$ µSv/h

معدل الجرعة الكلي:

$H^*_t = 1541 + 1750 = 3291$ µSv/h

$= 3.29$ mSv/hour

ويمكن حساب نفس المعدل باستخدام معامل جاما النوعي للكوبلت مباشرة باستخدام العلاقة (10–9)، حيث يكون:

$H^* = \Gamma \times S / R^2$

$= 0.356 \times (3.7 \times 10^{10} \times 10^{-6}) / (2)^2$

$= 3293$ µSv/h $= 3.29$ mSv/h

مثال:

احسب معامل جاما النوعي لنظير الكوبلت 60 إذا علمت أن النيكل 60 (النواة الوليدة للكوبلت) يصدر فوتونات جاما بطاقتين هما 1173، 1332 ك.إ.ف وبنسبة تفرع تبلغ 100 % ، 99.9 % بالترتيب.

الحل:

باستخدام العلاقة (10–8) يكون معامل جاما النوعي للكوبلت هو:

$= 0.142 \sum_i f \times E_i$

$= 0.142 (1 \times 1.173 + 0.999 \times 1.332)$

$= 0.356 \quad (\mu Sv/h).(m^2/MBq)$

10– 4 العوامل المؤثرة على الجرعات الخارجية

ورد أن الأخطار الخارجية تنتج عن المواد والمصادر المشعة الموجودة خارج جسم الإنسان. وتنتج هذه الأخطار عن جميع أنواع الإشعاعات والجسيمات المؤينة، باستثناء جسيمات ألفا. فقدرة هذه الجسيمات على اختراق الهواء والطبقة الخارجية للجلد الميت محدودة للغاية. أما جسيمات بيتا والأشعة السينية وإشعاعات جاما والنيوترونات فتتميز بقدرة عالية على الاختراق ويمكنها الوصول إلى أي عضو أو نسيج في الجسم عدا جسيمات بيتا التي يصل عمقها في الجسم إلى مسافات تعتمد على طاقتها وتتراوح بين حوالي 0.3 وحتى حوالي 1.5 سم. لذلك، تعتبر جميع المصادر المشعة (باستثناء بواعث ألفا) بمثابة مصادر للأخطار الخارجية.

ويخضع التحكم في الأخطار الخارجية لثلاثة عوامل رئيسة هي:
امتداد الفترة الزمنية للتعرض، أو ما يعرف بمعامل الزمن.
المسافة بين المصدر المشع والنقطة المعنية
وجود دروع أو حواجز واقية بين المصدر والنقطة المعنية.

10-4-1 زمن التعرض

إن أبسط أسلوب للوقاية من الأخطار الإشعاعية الخارجية هو قضاء أقل فترة زمنية ممكنة في الأماكن التي توجد فيها الإشعاعات. فالجرعة الإشعاعية المتراكمة في عضو ما H أو في جسم الإنسان ككل E تتناسب طرديا مع كل من طول الفترة الزمنية t ومعدل الجرعة المكافئة H^* أو الفعالة E^* في مكان وجوده، أي أن:

$$E = E^* \times t \qquad (10\text{-}10)$$

وتسري هذه العلاقة بالنسبة لكل من الجرعة الممتصة أو المكافئة أو الفعالة.

مثال:

من المعروف أن الحد السنوي للجرعة الفعالة للعاملين هو 20 ميللي سيفرت/سنة، فإذا كان معدل الجرعة الفعالة في أحد المختبرات 50 ميكرو سيفرت/ساعة، فكم ساعة يستطيع الفني في هذا المختبر أن يمكث في الأسبوع؟.

الحل:

يحسب أولا حد الجرعة (D.L) الأسبوعي علما بأن السنة تحتسب 50 أسبوع عمل:

$$(D.L) = 20 \text{ mSv} / 50 \text{ week}$$
$$= 0.4 \text{ mSv/week}$$

وباستخدام العلاقة (10-10) يكون الزمن المسموح خلاله بالبقاء داخل المختبر في الأسبوع الواحد هو:

$$t = E / E^*$$
$$= 0.4 \times 10^{-3} / 50 \times 10^{-6}$$
$$= 8 \text{ hours/week}$$

مثال:

فني طب نووي يعمل خمسة أيام في الأسبوع بواقع ثمان ساعات يوميا في أحد مختبرات الطب النووي، فما هو الحد الأقصى لمعدل الجرعة الفعالة الذي يسمح به في هذا المختبر.

الحل:

عدد ساعات العمل الأسبوعي هي:

$$= 5 \text{ days} \times 8 \text{ hours/day} = 40 \text{ h.}$$

وحيث أنه تبين من المثال السابق أن حد الجرعة الفعالة الأسبوعي للعاملين هو 0.4 ميللي سيفرت/أسبوع، وبتطبيق العلاقة (10–10) يكون الحد الأقصى لمعدل الجرعة الفعالة في المختبر هو:

$$E_{max}^{*} = E / t$$

$$= 0.4 \times 10^{-3} / 40 \times 10^{-6} = 0.01 \text{ mSv/h}$$

$$= 10 \text{ µSv/h}$$

وهكذا، يتبين أنه للوقاية من الأخطار الإشعاعية الخارجية يجب ألا يتجاوز زمن التعرض زمنا معينا يسهل تحديده بمعرفة معدل الجرعة المكافئة أو الفعالة في المكان المقصود. وكلما زاد معدل الجرعة في هذا المكان قل الزمن الذي يسمح بالبقاء خلاله داخل هذا المكان. وتعتبر مراقبة زمن وجود العاملين في الأماكن التي يزيد فيها معدل التعرض على 7.5 ميكرو سيفرت/ساعة أمرا ضروريا بالنسبة للعاملين بالإشعاع. والسبب في استخدام المعدل 7.5 ميكرو سيفرت بدلا من 10 هو أهمية وجود هامش أمان (حوالي 25 %) لتغطية احتمالات عدم الدقة في القياسات والمعايرات.

10–4–2 المسافة

ورد في الفصل السادس أن تدفق الجسيمات أو الإشعاعات (كثافة سيولة الجسيمات) الصادرة عن مصدر مشع على شكل نقطة صغيرة يتناسب تناسبا عكسيا مع مربع المسافة R بين هذا المصدر والنقطة المعنية . ولما كان معدل الجرعة الإشعاعية يتناسب تناسبا طرديا مع

تدفق الجسيمات أو الإشعاعات، فإنه يتضح أن معدل الجرعة يتناسب تناسبا عكسيا مع مربع المسافة بين المصدر والنقطة المعنية. بذلك، يرتبط معدل الجرعة (D_1^* أو H_1^* أو E_1^*) في نقطة معينة تبعد مسافة R_1 عن المصدر مع معدل الجرعة (D_2^* أو H_2^* أو E_2^*) عند نقطة أخرى تبعد مسافة R_2 عن نفس المصدر بالعلاقة التالية:

$$E_1^* \times R_1^2 = E_2^* \times R_2^2 \qquad (10\text{-}11)$$

وتجدر الإشارة إلى أن هذه العلاقة بين معدل الجرعة والمسافة تعتبر صحيحة للمصادر الصغيرة أو قليلة الامتداد، وتحديدا عندما يكون امتداد المصدر مهملا بالنسبة للمسافة بينه وبين النقطة المعنية. أما بالنسبة للمصادر الممتدة فلا تعتبر هذه العلاقة صحيحة إلا إذا كانت المسافة بين المصدر والنقطة المعنية أكبر بكثير من امتداد المصدر المشع.

وتعرف العلاقة (10–11) باسم قانون التربيع العكسي بين معدل الجرعة والمسافة. ويعني هذا القانون أنه عند زيادة المسافة للضعف يقل معدل الجرعة للربع (أي تربيع النصف)، وبزيادة المسافة إلى ثلاثة أضعاف يقل المعدل تسع مرات، وهكذا.

مثال:

إذا كان معدل الجرعة الفعالة الناتج عن مصدر كوبلت 60 في نقطة تبعد عنه 1 متر هو 6 ميللي سيفرت/ساعة، فما هو معدل الجرعة على مسافة 3 م من هذا المصدر؟.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10–11) يكون المعدل عند النقطة البعيدة هو:

$$H_2^* = H_1^* \times (R_1^2 / R_2^2)$$
$$= 6 \times (1)^2 / (3)^2$$
$$= 0.67 \quad \text{mSv/h}$$

مثال:

إذا كانت الجرعة الفعالة عند مسافة قدرها 0.5 متر من مصدر سيزيوم 137 هو 2 ميللي سيفرت/ساعة، فما هي المسافة من المصدر التي تصبح عندها الجرعة مساوية 50 ميكروسيفرت؟.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10-11) يكون:

$$R_2^2 = R_1^2 \times (E_1^* / E_2^*)$$

$$= (0.5)^2 \times (2 \times 10^{-3} / 50 \times 10^{-6}) = 10 \ m^2$$

وبأخذ الجذر التربيعي تكون المسافة المطلوبة هي:

$$R = (10)^{½} = 3.2 \ m$$

أي أن معدل الجرعة الفعالة ينخفض إلى 50 ميكروسيفرت عند الابتعاد عن المصدر لمسافة 3.2 متر.

10-4-3 الدروع (الحواجز) الواقية The shields

تعتبر الدروع والحواجز بين المصدر المشع والنقطة المعنية من أهم وسائل الوقاية من أخطار التعرض الخارجي. ففي بعض الأحيان يكون النشاط الإشعاعي للمصدر كبيرا، بحيث لا يمكن الاقتراب منه حتى عشرات وربما مئات الأمتار، وبالتالي فإنه لا يمكن تنفيذ الأعمال والمهام الواجبة عليه. كذلك فإن الاعتماد على عاملي المسافة والزمن يتطلب وجود مسؤول وقاية متفرغ بصفة مستمرة على رأس العمل حتى لا يتجاوز العاملون الفترات المقررة لوجودهم داخل المكان المعين.

لذلك، توضع المصادر المشعة ذات النشاط الإشعاعي المرتفع نسبيا داخل دروع أو قلاع واقية. ويتوقف نوع مادة الدرع وسمكه على نوع الإشعاعات وطاقاتها والنشاط الإشعاعي للمصدر، وكذلك على معدل الجرعة المحددة خارج هذا الدرع.

وبالنسبة لمصادر جسيمات ألفا فإن هذه المصادر لا تتطلب أي نوع من الدروع، طالما أنها لا تصدر سوى هذه الجسيمات، حيث أنها تمتص في طبقة من الهواء لا يتجاوز سمكها 4 سم.

9-4-3-1 دروع مصادر بيتا

ورد في الفصل الثالث أن جسيمات بيتا تتفاعل مع المادة بأسلوبين: هما التأيين والإثارة وهو نمط التفاعل السائد عند الطاقات المنخفضة لهذه الجسيمات وإصدار إشعاعات الانكباح (أي الأشعة السينية) ويكون هو النمط السائد عند الطاقات العالية للجسيمات. كذلك، تبين أن كمية الأشعة السينية الناتجة عن تفاعل هذه الجسيمات مع المادة تزداد بزيادة العدد الذري Z للمادة المتفاعلة وبزيادة طاقة الجسيمات.

لهذا السبب تعتبر المواد ذات العدد الذري Z الصغير مثل البرسبكس perspex أو الألومنيوم من أنسب المواد لعمل دروع مصادر جسيمات بيتا حتى يمكن خفض كمية الأشعة السينية المتولدة لأكبر حد ممكن. ومع ذلك فإن استخدام هذه المواد الخفيفة كدروع لبواعث جسيمات بيتا لا يكفي للوقاية من أخطار هذه المصادر. فرغم أنه يكفي عمل درع بسمك حوالي 0.3 سم حتى 1.3 سم (تبعا للطاقة القصوى لجسيمات بيتا) إلا أن الأشعة السينية المنبعثة من الدرع بسبب تفاعل الجسيمات مع مادته يمكن أن تمثل مخاطر جسيمة. لهذا السبب يجب أن يحاط درع جسيمات بيتا من الخارج بدرع آخر للوقاية من الأشعة السينية المتولدة على الدرع الأول.

وقد يعتقد البعض أنه يمكن التعامل مباشرة مع مصادر بيتا دون وجود درع (أي السافرة)، حيث أنها لا تشكل خطورة خارجية كبيرة مثل إشعاعات جاما أو النيوترونات، نظرا لقدرتها المحدودة نسبيا على اختراق الهواء. إلا أن هذا الاعتقاد غير صحيح، حيث أن مدى هذه الجسيمات يمكن أن يصل عدة أمتار كثيرة تزيد بزيادة طاقة الجسيمات. فضلا عن ذلك فإنه يكفي للتدليل على مدى خطورة هذه الجسيمات حساب معدل الجرعة المكافئة من مصدر بيتا صغير، يبلغ نشاطه

الإشعاعي 1 ميغا بكرل، يصدر جسيمات بيتا بطاقة متوسطة مقدارها 0.6 ميغا إلكترون فولط على مسافة 3 سم من المصدر، حي يبلغ هذا المعدل 0.3 غراي/ساعة.

وقبل التعرف على كيفية حساب سمك الدرع اللازم لمصدر جسيمات بيتا المعين ينبغي الإشارة إلى أن سمك هذا الدرع لا يعتمد إطلاقا على مقدار النشاط الإشعاعي للمصدر وإنما يعتمد فقط على الطاقة القصوى لهذه الجسيمات وعلى نوع مادة الدرع. فالدرع الذي يكفي للوقاية من مصدر ذي نشاط إشعاعي 1 ميغابكرل يكفي بدوره للوقاية من مصدر آخر يبلغ نشاطه الإشعاعي آلاف وملاين الميغا بكرل. وهذه الخاصية تميز دروع جسيمات بيتا دون غيرها. فسوف يتبين فيما بعد أن دروع الأشعة السينية أو إشعاعات جاما أو النيوترونات يزيد سمكها زيادة مطردة بزيادة النشاط الإشعاعي للمصدر.

حساب عدد فوتونات الأشعة السينية المتولدة عن درع مصدر بيتا

حيث أنه يلزم وجود درع آخر للأشعة السينية المنبعثة من الدرع الأول لجسيمات بيتا فإنه ينبغي معرفة عدد فوتونات الأشعة السينية المنبعثة عن درع هذه الجسيمات. وقبل حساب هذا العدد يجب معرفة نسبة الطاقة المتحولة F من جسيمات بيتا كطاقة إشعاعية في صورة أشعة سينية. ويمكن حساب هذه النسبة بدقة عالية عند معرفة العدد الذري لمادة الدرع Z والطاقة القصوى E_{max} الصادرة عن المصدر المعين، وذلك باستخدام العلاقة التالية:

$$F = 0.035 \times Z \times E_{max} \quad \% \qquad (10\text{-}13)$$

وهذه العلاقة تعكس الحقيقة التي سبق الإشارة إليها والتي تفيد بأنه كلما زادت الطاقة القصوى لجسيمات بيتا أو زاد العدد الذري للمادة المتفاعلة زادت بالتالي كمية الأشعة السينية المتولدة مع بقاء باقي الظروف ثابتة.

وبعد معرفة النسبة F وعدد جسيمات بيتا N_β المنبعثة من المصدر في الثانية، يمكن حساب عدد فوتونات الأشعة السينية N_x المتولدة بالعلاقة التالية:

$$N_x = F \times N_\beta / 3$$
$$= 0.00035 \times Z \times E_{max} \times N_\beta / 3 \qquad (10\text{-}13)$$

مثال:

مصدر فسفور 32 يبلغ نشاطه الإشعاعي ا كوري ويصدر جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 1.71 ميغا إلكترون فولط، موجود داخل درع من الألومنيوم (Z = 13)، احسب عدد فوتونات الأشعة السينية المنبعثة من الدرع.

الحل:

بتطبيق العلاقة (10–13) يكون العدد هو:

$$N_x = 0.00035 \times Z \times E_{max} \times N_\beta / 3$$
$$= 0.00035 \times 13 \times 1.71 \times 3.7 \times 10^{10} / 3$$
$$= 9.6 \times 10^{7} \text{ photons}$$

أي أن الدرع، في هذا المثال، يصدر في الثانية الواحدة 96 مليون فوتون من فوتونات الأشعة السينية. وعموما، تتوزع طاقة هذا العدد من الفوتونات من صفر حتى1.71 ميغا إلكترون فولت، حيث يكون طيف الأشعة السينية طيفا مستمرا. إلا أنه لأغراض الوقاية الإشعاعية تعتبر طاقة جميع هذه الفوتونات واحدة وهي الطاقة القصوى لجسيمات بيتا.

حساب سمك الدرع اللازم لمصدر جسيمات بيتا

يتم حساب سمك الدرع اللازم لنظير معين باعث لجسيمات بيتا بدلالة مدى هذه الجسيمات في مادة الدرع. ويحسب هذا المدى بدلالة

السمك الكتلي R الذي تعرفنا عليه في الفصل الثالث، والذي يعرف كحاصل ضرب السمك الطولي في كثافة المادة. وبالنسبة لجسيمات بيتا التي لا تزيد طاقتها على 2.50 ميغا إلكترون فولط، يمكن تحديد مداها الكتلي في المادة(بوحدة غرام/سم^2) بالعلاقة التالية:

$$R = 0.412 \times E_{max} (1.265 - 0.0954 \times \ln E_{max}) \qquad (10\text{-}14)$$

حيث ترمز للوغاريتم الأساس الطبيعي (وهو يساوي 2.71)

أما إذا زادت طاقة جسيمات بيتا على 2.50 ميغا إلكترون فولط

تصبح العلاقة (10-14) غير دقيقة، وتستخدم عندئذ العلاقة (10-15) التالية لحساب المدى الكتلي بنفس الوحدة:

$$R = 0.53 \times E_{max} - 0.106 \qquad (10\text{-}15)$$

وبعد حساب المدى الكتلي باستخدام المعادلة الملائمة للطاقة القصوى لطيف جسيمات بيتا يتم إضافة 10- 15 % إلى هذا المدي كهامش أمان . ويعتبر المدى الناتج بعد الإضافة هو سمك الدرع المطلوب من هذه المادة لذلك النظير. وعند الحاجة لحساب هذا السمك بالوحدة الطولية العادية، يتم قسمة السمك الكتلي على كثافة المادة.

مثال:

احسب السمك الكتلي للدرع اللازم لمصدر سترونشيوم 90 بحيث تمتص جميع جسيمات بيتا المنبعثة من ذلك المصدر داخل الدرع، ثم احسب السمك الطولي عند استخدام الألومنيوم (كثافته 2.7 غرام/سم^3) والبلكسغلاس (كثافته 1.18 غرام/سم^3).

الحل:

من المعروف أن نظير سترونشيوم 90 يصدر جسيمات بيتا بطاقة قصوى مقدارها 0.546 م.إ.ف، ثم يتحول بعد ذلك إلى نظير الإيتريوم 90 المشع بدوره لجسيمات بيتا ولكن بطاقة قصوى مقدارها 2.284 م.إ.ف. لذلك، يجب استخدام الطاقة القصوى للإيتريوم لأنها الأكبر، والدرع الذي

يصلح للطاقة الأكبر يصلح بدوره للطاقة الأصغر، والعكس غير صحيح. وحيث أن الطاقة القصوى للإيتريوم هي 2.284 م.إ.ف فإنه يجب استخدام العلاقة (10-14)، أي أن:

$$R = 0.412 x E_{max} \times (1.265 - 0.0954 \ln E_{max})$$
$$= 0.412 \times 2.284 \times (1.265 - 0.0954 \ln 2.284)$$
$$= 1.116 \quad gm / cm^2$$

بعد ذلك يجب إضافة 15 % من هذا السمك الأخير كهامش أمان، وبذلك يكون السمك الكتلي المطلوب لنظير سترونشيوم 90 هو:

$$R^* = 1.116 \times 1.15 = 1.283 \quad gm/ cm^2$$

ولحساب السمك الطولي من الألومنيوم يجب قسمة السمك الكتلي على كثافة الألومنيوم، أي أن سمك الدرع المطلوب من الألومنيوم هو:

$$X_{Al} = 1.283 / 2.7$$
$$= 0.475 \quad cm \approx 5 \quad mm$$

وسمك الدرع المطلوب حال استخدام البلكسغلاس هو:

$$X_{plex} = 1.283 / 1.18$$
$$= 1.087 \quad cm \approx 1.1 \quad cm$$

9-4-3-2 دروع الأشعة السينية وإشعاعات جاما

ورد في الفصل الثالث أنه عند مرور الأشعة السينية أو إشعاعات جاما خلال مادة ما فإنه يحدث توهين لعدد الفوتونات التي تجتاز سمكا من هذه المادة وفقا للقانون الأسي الذي يتخذ الصورة التالية:

$$I = I_0 \, e^{-\mu x}$$

حيث: I_0 أن هو عدد الفوتونات الساقطة على المادة، I هو عدد الفوتونات التي تجتاز سمكا من المادة مقداره x دون تفاعل، μ هو معامل التوهين الطولي للمادة عند طاقة الإشعاعات المقابلة.

وحيث أن معدل الجرعة الممتصة أو المكافئة أو الفعالة يتناسب تناسبا طرديا مع عدد الفوتونات، فإنه يمكن التعبير عن معدل الجرعة

الناتجة عن هذه الإشعاعات بعد اختراقها للدرع الذي يبلغ سمكه x بعلاقة مماثلة لعلاقة التوهين تتخذ الصورة التالية:

$$E^* = E_0^* \, e^{-\mu x} \qquad (10\text{-}16)$$

حيث E^* هو معدل الجرعة الفعالة بعد اجتياز درع يبلغ سمكه x ، E_0^* هو معدل الجرعة الفعالة في نفس النقطة في حالة عدم وجود الدرع، μ معامل يعرف باسم معامل امتصاص الطاقة. ويختلف هذا المعامل الأخير عن معامل التوهين الوارد في الفصل الثالث اختلافا محدودا

معامل امتصاص الطاقة μ

إن معامل التوهين الذي يعبر عن تناقص عدد الفوتونات كلما تغلغلت في المادة لا يعكس في الواقع كمية الطاقة التي تمتصها المادة عند تغلغل الإشعاعات فيها. فعند مرور الفوتون في المادة فإنه يمكن أن يفنى نتيجة العملية الكهروضوئية أو عملية إنتاج الزوج الإلكتروني البوزيتروني. وفي العملية الأولى يفقد الفوتون كل طاقته في المادة. أما في الحالة الثانية فرغم أن الفوتون يفنى وتنتقل طاقته للمادة إلا أن جزءا من هذه الطاقة قد يعود من جديد في صورة فوتون أو فوتوني الفناء. فعندما يفقد البوزترون طاقته فإنه يفنى مع أحد إلكترونات المادة وينطلق، نتيجة لذلك، فوتونين يحمل كل منهما طاقة تساوي 511 ك.إ.ف، وقد يخرج أحد هذين الفوتونين أو كلاهما من المادة دون تفاعل جديد. لذلك، يقال أن طاقة الفوتون قد لا تنتقل بالكامل للمادة. كذلك، فإنه في حالة تفاعل الفوتون مع المادة من خلال تشتت كمبتون فإن طاقة الفوتون لا تنتقل بالكامل إلى الإلكترون الحر وإنما ينتقل جزء منها ويتشتت الفوتون حاملا الجزء الباقي من الطاقة.

وحيث أن معدل الجرعة يعتمد على الطاقة المنقولة لوحدة الكتلة من المادة، لذلك فإنه يجب استخدام المعامل الذي يعين انتقال الطاقة من الإشعاعات للمادة وامتصاصها فيها، وهو ما يعرف بمعامل انتقال الطاقة. ويجدول هذا المعامل الأخير، عادة في المراجع للمواد، في

صورة معامل امتصاص الطاقة الكتلي الذي يساوي المعامل الخطي لامتصاص الطاقة مقسوما على كثافة المادة الممتصة. وفي جميع حسابات دروع الأشعة السينية وإشعاعات جاما يجب استخدام معامل امتصاص الطاقة بدلا من معال التوهين الوارد في الفصل الثالث.

وتجدر الإشارة إلى أن معامل امتصاص الطاقة يقل بنسبة محدودة (أي صغيرة) عن معامل التوهين للأسباب سالفة الذكر، وتختلف هذه النسبة باختلاف طاقة الإشعاعات.

الامتصاص الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما

من حيث المبدأ يمكن استخدام علاقة الامتصاص الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما (10–16) لحساب سمك الدرع اللازم لخفض الجرعة المكافئة أو الفعالة خارج الدرع للحد المطلوب. إلا أنه يجب الإشارة إلى أن سمك الدرع المحسوب وفقا لهذه العلاقة يكون غير كاف في الغالبية العظمى من الحالات، ولا تصلح هذه العلاقة للاستخدام إلا في الظروف المثالية غير الواقعية والتي تتمثل في الآتي:

أ– حزمة ضيقة جدا ومتوازية من الأشعة
ب– سمك الدرع صغير للغاية.

وعند تحقق هذين الشرطين فإنه يمكن حساب سمك الدرع بالعلاقة (10–16) أو باستخدام ما يعرف بالسمك النصفي $X_{1/2}$ أو السمك العُشري $X_{1/10}$. ويعرف السمك النصفي هنا على أنه "سمك المادة الذي يخفض الجرعة الإشعاعية إلى نصف مقدارها. ويجب أن يحسب هذا السمك باستخدام معامل امتصاص الطاقة (بدلا من معامل التوهين) وفقا للعلاقة المعروفة:

$$X_{1/2} = 0693 / \mu \qquad (10\text{-}17)$$

وهكذا، فإن الدرع أو الحاجز الذي يساوي سمكه سمكا نصفيا واحدا يخفض معدل الجرعة الإشعاعية إلى النصف. وإذا كان سمك

الدرع مساويا خمسة أضعاف السمك النصفي فإن هذا الدرع يخفض الجرعة بواقع 32 مرة، حيث أن $(2/1)^5 = (32/1)$، وعندما يكون سمك الدرع مساويا عشرة أضعاف السمك النصفي فإن هذا الدرع يخفض الجرعة بواقع 1024 مرة حيث أن $(2/1)^{10} = (1024/1)$، وهكذا.

ومعرفة السمك النصفي مفيد لإيجاد السمك المطلوب للدرع بطريقة سهلة وسريعة. ويبين جدول (10–11) قيم معامل الامتصاص الخطي μ بوحدة سم$^{-1}$ وقيم السمك النصفي بوحدة سم، لبعض المواد المستخدمة لعمل دروع واقية من الأشعة السينية وإشعاعات جاما، عند طاقات مختلفة.

جدول (10–11): قيم معامل الامتصاص والسمك النصفي لبعض المواد عند بعض الطاقات

الطاقة (م.إ.ف)	ماء		حديد		رصاص		خرسانة	
	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم
0.01	4.48	0.155	1330	0.0005	1340	0.0005	57.8	0.012
0.1	0.65	4.20	2.60	0.27	58.2	0.012	0.397	1.75
0.5	0.069	15.0	1.32	0.53	1.65	0.42	0.224	3.09
1.0	0.07	19.0	0.47	1.47	0.77	0.90	0.150	4.62
1.5	0.034	20.0	0.38	1.82	0.48	1.45	0.107	6.48
2.0	0.031	22.5	0.33	2.10	0.39	1.80	0.087	7.97
5.0	0.025	27.5	0.28	2.48	0.50	1.40	0.072	9.62
10.0	0.022	32.5	0.23	3.01	0.54	1.28	0.054	12.8

السمك العشري:

هو ذلك السمك من المادة الذي يؤدي عند وضعه في طريق الإشعاعات إلى خفض الجرعة الإشعاعية الناتجة إلى جزء من عشرة أجزاء من قيمتها دون وجود الدرع، أي أن:

$$X_{1/10} = \ln 10 / \mu = 2.303 / \mu \qquad (10\text{-}18)$$

ومن هنا يتضح أن السمك العُشري أكبر من السمك النصفي بمقدار 3.32 ضعفا.

مثال:

مصدر كوبلت 60 موجود يؤدي إلى معدل جرعة فعالة مقداره 320 ميكروسيفرت/ساعة عند نقطة معينة من المصدر، احسب سمك درع الرصاص اللازم وضعه بين المصدر والنقطة لخفض معدل الجرعة إلى 10 ميكروسيفرت/ساعة.

الحل:

عدد مرات الخفض المطلوبة في معدل الجرعة هي:

$$320 / 10 = 32$$

وحيث أن:

$$32 = (2)^5$$

يكون عدد مرات السمك النصفي المطلوبة هو 5 . وحيث أن السمك النصفي للرصاص عند طاقة الكوبلت (1.332 ك.إ.ف هو 1.25 سم، يكون سمك الرصاص المطلوب هو:

$$X = 5 \times 1.25 = 6.25 \quad cm$$

مثال:

مصدر كوبلت 60 يبلغ نشاطه الإشعاعي 5000 كوري موضوع داخل قلعة كروية، احسب سمك الجدار اللازم للقلعة بحيث لا تتجاوز الجرعة الفعالة لعامل يمكث 35 ساعة أسبوعيا على مسافة 0.5 متر من المصدر حد الجرعة الأسبوعي، علما بأن السمك النصفي للرصاص وإشعاعات جاما من الكوبلت 60 هو 1.25 سم.

الحل:

يحسب أولا معدل الجرعة الفعالة من المصدر على بعد 0.5 م باستخدام العلاقة (10−7) أو (10−9) حيث يكون:

$$E^* = 0.356 \times 5000 \times 3.7 \times 10^4 / (0.5)^2$$

$$= 2.63 \times 10^8 \quad \mu Sv/h$$

وحيث أنه قد سبق حساب حد الجرعة المسموح للعاملين وهو 400 ميكرو سيفرت/أسبوع، يكون المعدل المقابل للجرعة عند العمل 35 ساعة أسبوعيا هو:

$$400 / 35 = 11.43 \quad \mu Sv/h$$

بذلك يسهل حساب عدد مرات التخفيض المطلوبةn، حيث تكون:

$$n = 2.63 \times 10^8 / 11.43 = 2.3 \times 10^7$$

وحيث أن هذا العدد الأخير هو عبارة عن 2 مرفوعة للأس 24.45 ، أي أن:

$$2.3 \times 10^7 = (2)^{24.45}$$

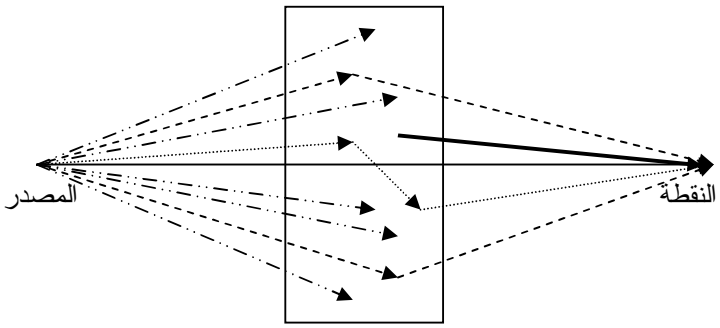
يكون سمك الدرع المطلوب هو:

$$X = 24.45 \times 1.25 = 30.56 \text{ cm}$$

التراكم ودوره في حساب سمك الدرع

من حيث المبدأ يستحيل تحقيق المطلبين المذكورين في الفقرة السابقة والخاصين بوجوب أن تكون حزمة الأشعة الساقطة على الدرع حزمة ضيقة ومتوازية، وأن يكون سمك الدرع صغيرا. فقد تبين من المثال السابق أن سمك الدرع قد زاد على 30 سم من الرصاص، كما أن المصدر يصدر إشعاعاته في جميع الاتجاهات. ويؤدي هذان الوضعان إلى حدوث ما يعرف بالتراكم (Build up). ولإيضاح مفهوم التراكم يمكن الاستعانة بالشكل (10–3). فالإشعاعات تخرج من المصدر في جميع الاتجاهات وتمتص نسبة منها في الدرع وفقا لقانون التوهين الأسي، مثل جميع الأشعة المتقطعة المنقطة الخمسة على الشكل. ويمر الشعاع الذي يخترق الدرع ويصل مباشرة للنقطة المعنية والذي تحسب حالاته وفقا لقانون التوهين الأسي كذلك. أما الشعاعان المتقطعان فإنه رغم أنهما كانا متجهين بعيدا عن النقطة المعنية إلا أنهما سقطا على هذه النقطة بسبب تشتت كمبتون. كذلك فإن الشعاع المنقط قد عانى تشتتا مرتين

بسبب السمك الكبير للدرع، وسقط بدوره على النقطة المعنية. كذلك يمكن أن يؤدي تولد الأزواج داخل الدرع وتفاعل البوزترونات مع إلكترونات المادة إلى انطلاق فوتونات الفناء ذات الطاقة 511 ك.إ.ف نحو النقطة، مثل الشعاع المستمر المتولد في النصف الأعلى من الدرع.



شكل (10–3): توضيح مفهوم التراكم

وهكذا، فإنه نتيجة لوصول فوتونات إلى النقطة المعنية، بخلاف تلك التي تصل نفس النقطة بالقانون الأسي للتوهين، لم يعد ذلك القانون صالحا للتطبيق.

وهكذا، فإن التراكم ينتج في الغالبية العظمى من الظروف السائدة وهي الحزم العريضة من الإشعاعات والسمك الكبير نسبيا للدرع. وأما نمطا التفاعل المسؤولان عن حدوث التراكم فهما تشتت كمبتون وإنتاج الأزواج. لذلك يصبح دور التراكم كبيرا جدا عند الطاقات العالية لإشعاعات جاما.

ويمكن حساب عدد الفوتونات الكلية I_t التي تصل النقطة المعنية خلف الدرع، حيث يتكون هذا العدد من:

أ- مركبة مباشرة I_d تخترق سمك الدرع دون تفاعل.
ب- مركبة متشتتة I_s كانت فوتوناتها متجهة في الأصل بعيدا عن النقطة واتجهت بعد تشتت كمبتون إليها، أو تولدت فوتوناتها نتيجة فناء البوزترونات مع إلكترونتات مادة الدرع.

أي أن عدد الفوتونات الإجمالي هو:

$$I_t = I_d + I_s \qquad (10\text{-}19)$$

ويعرف معامل التراكم B على أنه النسبة بين العدد الكلي للفوتونات I_t التي تصل النقطة المعنية مباشرة من المصدر في وجود الدرع وبسبب التشتت أو التولد في مادة الدرع إلى عدد الفوتونات التي تخترق الدرع دون تفاعل I_d وتصل مباشرة للنقطة المعنية وفقا للقانون الأسي، أي أن:

$$B = I_t / I_d = (I_d + I_s) / I_d \qquad (10\text{-}20)$$

وتجدر الإشارة إلى أن معامل التراكم يمكن أن يتخذ قيما كبيرة قد تصل مئات وآلاف المرات. ومعنى هذا أن الدرع المحسوب على أساس التوهين الأسي لا يعتبر كافيا ويجب زيادة سمك الدرع لموازنة دور التراكم في زيادة معدل الجرعة.

مثال:

إذا علمت أن معامل التراكم في ظروف معينة وفي نقطة معينة بالنسبة لمصدر مشع محاط بدرع هو 5 ، ما هي نسبة الإشعاعات التي تصل النقطة وفقا للقانون الأسي؟، وما هي النسبة بسبب التراكم؟.

الحل:

باستخدام العلاقة (10-20)، واعتبار دائما بمثابة الوحدة (أي واحد صحيح) يكون:

$$B = 5 = (I_d + I_s) / I_d = (1 + I_s) / 1$$

ومنها يتبين أن تساوي 4 ، أي أن نسبة الإشعاعات المباشرة التي تصل النقطة هي:

$$(1 / 5) \times 100 = 20\ \%$$

والنسبة التي تصل بسبب التراكم هي:

$$(4 / 5) \times 100 = 80\ \%$$

وهكذا، فإنه عند احتساب التراكم B تصبح العلاقة (10–16) غير صالحة لحساب سمك الدرع المطلوب، وتتخذ العلاقة عندئذ الصيغة التالية:

$$E^* = B\ E_0^*\ e^{-\mu x} \qquad (10\text{-}21)$$

مثال:

في المثال قبل السابق حيث كانت شدة المصدر 5000 كوري، إذا علمت أن معامل التراكم يبلغ 32 مما هو السمك اللازم للدرع لتحقيق معدل الجرعة الفعالة المطلوب.

الحل:

يمكن إيجاد سمك الدرع الجديد بطريقتين. في الطريقة الأولى فإن معامل التراكم يؤدي إلى زيادة المعدل 32 ضعفا وبالتالي يجب توهين الجرعة 32 مرة. وحيث أن $(32) = (2)^5$ فإنه يجب إضافة سمك إضافي للدرع السابق يساوي خمسة أضعاف السمك النصفي، أي أن السمك الكلي يصبح:

$$X = 30.56 + 5 \times 1.25$$

$$= 36.81 \quad cm$$

والحل الآخر هو بالتطبيق المباشر للعلاقة(10–21) وحساب قيمة معامل الامتصاص μ بدلالة السمك النصفي، حيث يكون المعامل هو:

$$\mu = \ln 2 / X_{1/2} = 0.693 / 1.25 = 0.5544\ \ cm_{-1}$$

وبالتعويض عن قيم المعدلات ومعامل التراكم ثم أخذ لوغاريتم طرفي المعادلة للتخلص من الدالة الأسية يتم الحصول على علاقة خطية، وذلك كالآتي:

$$E^* = B\ E_0^*\ e^{-\mu x}$$

$$^{11.43} \quad = 32 \times 2.63 \times 10^8 \times e^{-0.5544\ X}$$

$$1.358 \times 10^{-9} = e^{-0.5544\ X}$$

$$-20.417 \quad = -0.5544\ x$$

$$x = 36.82 \quad cm$$

وهي نفس النتيجة السابقة.

10-4-3-3 دروع النيوترونات السريعة

درسنا في الفصل الثالث أن النيوترونات السريعة تفقد طاقتها أساسا عن طريق التشتت المرن على النوى الخفيفة. وقد ورد أنه يفضل استخدام مواد غنية بالعناصر الخفيفة كالهيدروجين لتهدئة النيوترونات. لذلك، فإنه عند عمل حواجز واقية من النيوترونات السريعة يجب أولا تهدئة هذه النيوترونات، وذلك باستخدام طبقة ذات سمك مناسب من الماء أو شمع البرافين لاحتوائهما على الهيدروجين بنسبة عالية. وقد وجد في (الفصل الثالث) أن متوسط عدد التصادمات اللازمة لتحويل النيوترون السريع إلى نيوترون حراري تبلغ حوالي 18-19 تصادما مع ذرات الهيدروجين. وعند معرفة متوسط المسار الحر للنيوترون في المادة المعينة فإنه يمكن حساب السمك المادة اللازم منها لتهدئة النيوترونات.

وبعد تحويل النيوترونات السريعة إلى حرارية يصبح من السهل امتصاصها وذلك باستخدام مادة ذات مقطع عرضي كبير لامتصاص النيوترونات الحرارية. وتستخدم مادة الكادميوم Cd لهذا الغرض، حيث أن المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات في الكادميوم كبير للغاية. ونتيجة للامتصاص النيوتروني تنطلق إشعاعات جاما طبقا للتفاعل:

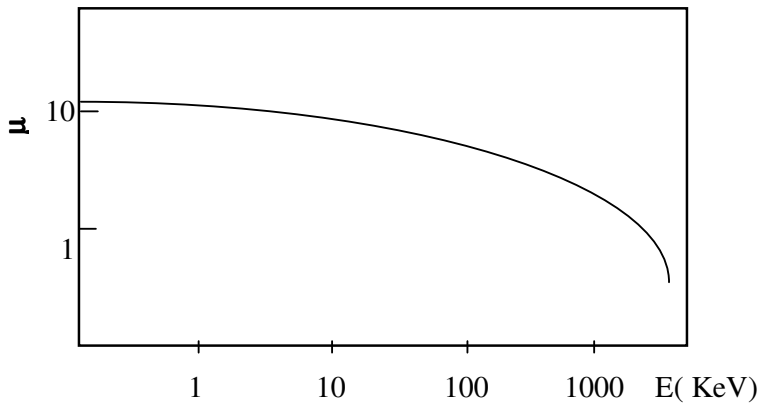
$$^{114}Cd + n \longrightarrow {}^{115}Cd + \gamma$$

وهكذا، فإنه عند عمل حواجز واقية من النيوترونات، يستخدم سمك من الماء أو شمع البرافين (في حدود 20 – 30 سم)، يليه شريحة رقيقة من مادة الكادميوم لامتصاص النيوترونات الحرارية ثم تغطى هذه

الشريحة الأخيرة بسمك من الرصاص أو الخرسانة المسلحة، وذلك لامتصاص إشعاعات جاما الناتجة.

وفي أغلب الأحيان، لا تتاح إمكانية استخدام شرائح الكادميوم لامتصاص النيوترونات الحرارية، عندئذ يمكن الاكتفاء باستخدام سمك كبير من الماء أو شمع البرافين. ويقوم الدرع بعملية التهدئة والامتصاص النيوتروني، حيث يتناقص عدد النيوترونات تبعا للقانون الأسي الوارد في البنود السابقة مع اختلاف قيمة معامل الامتصاص μ للنيوترونات عنه معامل الامتصاص لإشعاعات جاما. ويعتمد معامل الامتصاص النيوتروني اعتمادا كبيرا على طاقة النيوترونات وعلى نوع المادة الممتصة. ويبين شكل (10–4) كيفية تغير هذا المعامل بتغير طاقة النيوترونات وذلك لعنصر الهيدروجين عند وحدة الكثافة (أي عندما تكون كثافة الهيدروجين مساوية 1 جم/سم^3). فإذا كانت المادة المستخدمة للامتصاص النيوتروني عبارة عن مركب يحتوى على الهيدروجين كأحد العناصر المكونة لها فإنه يجب معرفة النسبة الوزنية للهيدروجين في هذا المادة. وتكون كثافة الهيدروجين ρ^* في هذا المركب هي عبارة عن حاصل ضرب كثافة المركب ρ في النسبة الوزنية C للهيدروجين في المركب، أي أن:

$$\rho^* = C \times \rho$$



شكل (10–4): معامل الامتصاص النيوتروني
عند وحدة الكثافة للهيدروجين كدالة من طاقة النيوترونات

وعندئذ يكون معامل الامتصاص النيوتروني الفعلي*μ هو عبارة عن حاصل ضرب كثافة الهيدروجين في المركب ρ^* في معامل الامتصاص عند وحدة الكثافة μ، أي أن:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$

مثال:

مصدر نيوتروني يصدر نيوترونات سريعة بطاقة حوالي 7 ميغا إلكترون فولت وضع في مركز خزان ماء أسطواني الشكل. فإذا كان نصف قطر مقطع الأسطوانة 75 سم. فكم من المرات ينخفض التدفق النيوتروني عند السطح الأسطواني للخزان.

الحل:

من المعلوم أن النسبة الوزنية للهيدروجين في الماء (H_2O) هي:

$$1 : 9$$

أي أن النسبة الوزنية للهيدروجين C هي:

$$C = (1/9) \times 100 = 0.11 \ \%$$

وكثافة الهيدروجين في الماء تساوي كثافة الماء في النسبة الوزنية للهيدروجين، أي أن:

$$\rho^* = C \times \rho = 1 \times 011 \ \%$$
$$= 0.11 \quad gm/cm^{3\rho}$$

وبالرجوع للشكل(10–3) يلاحظ أن معامل الامتصاص للنيوترونات بطاقة 7 ميغا إلكترون فولت هو 0.76 سم$^{-1}$ عند وحدة الكثافة للهيدروجين. بذلك يكون معامل الامتصاص عند الكثافة الفعلية هو:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$
$$= 0.76 \times 0.11 = 0.0836 \ \ cm^{-1}$$

وباستخدام العلاقة (10–17) يمكن إيجاد قيمة السمك النصفي للهيدروجين في الماء، حيث يساوي:

$$X_{1/2} = 0.693 / \mu^*$$

$$= 0.693 / 0.0836 = 8.3 \quad cm$$

بذلك يكون عدد مرات السمك النصفي n في 75 سم هو:

$$n = 75 / 8.3 = 9.04 \quad (HVL)$$

بذلك يكون عدد مرات توهين التدفق النيوتروني هو:

$$(2)^{9.04} = 526 \quad times$$

وعند التعامل مع نيوترونات بطاقات مختلفة فإنه نظرا لاختلاف معامل الامتصاص باختلاف طاقة النيوترونات تصبح الأمور أكثر تعقيدا. عندئذ يمكن استخدام قيمة متوسطة لمعامل الامتصاص لهذه الطاقات عند وحدة الكثافة. ويبين جدول (10–12) معامل الامتصاص المتوسط للنيوترونات الناتجة عن الانشطار النووي لبعض العناصر.

جدول(10–12)

معامل الامتصاص لبعض المواد عند وحدة الكثافة

العنصر	معامل الامتصاص μ (سم^2/جم)
حديد	0.020
هيدروجين	0.612
أكسجين	0.041
كالسيوم	0.024
سليكون	0.295

مثال:

احسب مقدار التوهين لحاجز مائي سمكه 150 سم للنيوترونات الناتجة عن الانشطار النووي.

الحل:

من جدول (10–12) يتبين أن معامل الامتصاص للهيدروجين (عند وحدة الكثافة) هو 0.602 سم^2/جم. والنسبة الوزنية للهيدروجين في الماء تساوي 11% (راجع المثال السابق).

بذلك يكون معامل الامتصاص الفعلي للهيدروجين في الماء هو:

$$\mu^* = \mu \times \rho^*$$
$$= 0.612 \times 0.11 = 0.06622 \quad cm^{-1}$$

ومنه يكون السمك النصفي للهيدروجين في الماء هو:

$$X_{1/2} = 0.693 / 0.06622 = 10.47 \quad cm$$

ويكون عدد مرات السمك النصفي n في 150 سم هو:

$$n = 150 / 10.47 = 14.33 \quad (HVL)$$

وبالتالي يكون مقدار التوهين بواسطة هيدروجين طبقة الماء هو:

$$(2)^{14.33} = 20595 \quad times$$

ثم نقوم بإجراء نفس الحسابات بنفس الأسلوب بالنسبة لأكسجين الماء. فمن جدول (10–12) يتبين أن معامل الامتصاص للأكسجين في الماء عند وحدة الكثافة هو0.041 سم^2/جم. وحيث أن النسبة الوزنية للأكسجين في الماء هي 0.89 % يكون معامل الامتصاص الفعلي للأكسجين في الماء هو:

$$\mu^* = 0.041 \times 0.89 = 0.0365 \quad cm^{-1}$$

وبالتالي، يكون السمك النصفي للأكسجين في الماء هو:

$$X_{1/2} = 0.693 / 0.0365 = 18.99 \quad cm$$

ويكون عدد مرات السمك النصفي للأكسجين في الماء:

$$n = 150 / 18.99 = 7.9 \quad (HVL)$$

وبذلك يكون مقدار التوهين النيوتروني بواسطة الأكسجين في الماء هو:

$$(2)^{7.9} = 239 \quad times$$

وبالتالي يكون مقدار التوهين الإجمالي لعنصري الماء هو حاصل ضرب مقدار التوهين بواسطة الهيدروجين في مقدار التوهين بواسطة الأكسجين، أي يساوي:

$$20595 \times 239 = 4.92 \times 10^{6} \quad \text{times}$$

6-10 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- اذكر أهم مصادر الإشعاعات الطبيعية في البيئة، وما هو معدل الجرعة الفعالة الفردية المتوسطة الناتجة عنها على مستوى العالم؟، وما هي الجرعات الفعالة الجماعية الناتجة عنها؟ (باعتبار أن عدد سكان العالم 6 مليار نسمة).

2- ما هي أهم مصادر الجرعات الإشعاعية الناتجة عن المصادر الصناعية؟، وما هي معدلات الجرعات الفردية والجماعية الناجمة عنها؟

3- ما هي العوامل التي تتحكم في الأخطار الإشعاعية من المصادر الخارجية؟، وكيف يمكن التحكم في قيمة الجرعات الناتجة عن هذه الأخطار، مع ذكر العلاقات الرياضية وشرح معناها؟

4- اشرح معنى معامل جاما النوعي.

5- اشرح كيف يمكن عمل درع لمصدر بيتا، وما هي أهم المواد المفضلة لعمل هذا الدرع؟.

6- كيف يرتبط سمك الدرع المطلوب لجسيمات بيتا من مادة معينة مع مدى هذه الجسيمات في هذه المادة؟.

7- لماذا تحاط مصادر بيتا عادة بدرعين مصنوعين من مواد مختلفة؟ وما هو ترتيب وضع الدرعين بالنسبة للمصدر؟.

8- هل يصلح قانون التوهين الأسي للأشعة السينية وإشعاعات جاما لحساب سمك الدرع في الحالات الواقعية؟، وما هو السبب في إجابتك؟.

9- اشرح مفهوم التراكم، وما هي أسبابه؟، وما هي الظروف التي يمكن عندها إهماله؟.

10- إذا قيل لك أن معامل التراكم لجدار معين عند طاقة معينة وعند نقطة معينة من جهاز للأشعة السينية هو 4، فما هي نسبة دور كل من الأشعة المباشرة والمتشتتة في الجرعة المتولدة عند هذه النقطة.

11- اشرح كيفية عمل درع للوقاية من النيوترونات السريعة. وما هي العوامل التي يجب أن تؤخذ في الحسبان عند عمل مثل هذا الدرع؟.

12- احسب الجرعة الفعالة التي يحصل عليها مسافر بطائرة تطير على ارتفاع 10 كم من سطح البحر لمدة 7 ساعات.

13- احسب الجرعة الفعالة التي حصل عليها طيار يطير على ارتفاع 20 كم لمدة ساعة ونصف.

14- اضطر أحد الفنيين إلى أن يعمل في منطقة يبلغ متوسط الجرعة الفعالة فيها 150 ميكروسيفرت/ساعة، كم ساعة يسمح له بالعمل خلال الأسبوع، بحيث لا تتجاوز الجرعة المتراكمة له في أسبوع 0.4 ميللي سيفرت؟، احسب كم مرة يجب تخفيض متوسط الجرعة بحيث يتمكن من العمل لمدة 30 ساعة أسبوعيا.

15- مصدر سترونشيوم 90 (مصدر بيتا) نشاطه الإشعاعي 3 ميللي كوري، احسب معدل الجرعة الناتجة على مسافة 40 سم من هذا المصدر (أهمل الامتصاص في الهواء).

16- احسب معدل الجرعة المكافئة الناتجة على مسافة 60سم من مصدر فسفور 32 إذا علمت أنه عند تسجيل هذه الجسيمات على بعد 30 سم من المصدر بواسطة عداد غايغر قطر نافذته 2 سم كان معدل العد 3000 جسيم/دقيقة (أهمل الامتصاص في الهواء) .

17- احسب معدل الجرعة الفعالة الناتجة على مسافة 0.5 م من مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 60 كيوري، ثم احسب المسافة التي يتحقق عندها حد الجرعة للعاملين المهنيين.

18- مصدر سترونشيوم 90 مستخدم في الطب على شكل شريحة رقيقة نشاطه الإشعاعي 1 كوري محاط بدرع من الألومنيوم يكفي بالكاد لامتصاص جسيمات بيتا الصادرة من المصدر، ما هي نسبة طاقة جسيمات بيتا المتحولة لأشعة سينية؟، وما هو عدد فوتونات الأشعة السينية الصادرة عن الدرع، علماً بأن العدد الذري للألومينيوم هو 13.

19- ما هو مدى جسيمات بيتا الصادرة من المصدر المذكور في المسألة السابقة؟، وما هو سمك درع جسيمات بيتا المطلوب؟

20- إذا علمت ان السيزيوم137 يصدر يتفكك إلى الباريوم137 الذي يصدر فوتونات جاما بطاقة 662 ك.إ.ف احسب معامل جاما الموعي للسيزيوم 137.

21- مصدر سيزيوم 137 يبلغ نشاطه الإشعاعي 3000 ميغا بيكريل،

احسب الجرعة الفعالة على مسافة 1م منه، إذا علمت أن السيزيوم يصدر فوتونات جاما بطاقة 662 ك.إ.ف في 85 % فقط من تفككاته، ثم احسب سمك الدرع اللازم حتى تصبح الجرعة الفعالة 25 ميكروسيفرت/ساعة على بعد 50 سم من المصدر.

22- مصدر كوبلت 60 نشاطه الإشعاعي 10 كيلو كيوري، احسب معدل الجرعة الفعالة المتولدة عن هذا المصدر على مسافة 2 م منه. وما هو سمك درع الرصاص اللازم لاحتواء المصدر إذا علمت ان معامل التراكم من هذا الدرع يساوي 6.

23- مولد نيوتروني يصدر نيوترونات سريعة بطاقة 14 م.إ.ف. احسب سمك الدرع المائي اللازم لخفض التدفق النيوتروني بمقدار 40960 مرة.